SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

© PELPAS FOCE / ARTEM SHUTTERSTOCK
MAESTRO ART SHUTTERSTOCK

GUERRE EN UKRAINE
La coopération scientifique en danger p.10

Quantique

LA RÉVOLUTION DU XXIe SIÈCLE p.34

Ordinateur, cryptographie, médecine...
CE QUI VA CHANGER

AVRIL 2022 - N° 902 - ALLEMAGNE 7,40 € / AUTRICHE 6,50 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / DOM 5,80 € / DOM-AVION 7,80 € / ANDORRE 5,40 € / PORTUGAL 5,70 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8,60€ ; TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USD 9,20 $

L 13418 - 902 - F: 5,30 € - RD

MÉDECINE
Stimuler la moelle épinière contre la douleur p.66

ARCHÉOLOGIE
Voir dans les momies p.76

CLIMAT
Les innovations pour décarboner l'industrie p.58

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 902 - AVRIL 2022 - QUANTIQUE : LA RÉVOLUTION DU XXIe SIÈCLE

RIVAGES
DU MONDE

Prendre le large, c'est essentiel.

RCS Paris B 438 679 664 – 150 000 euros - Atout France IM 075 100 099 – Crédit Dreamstime

Croisières

EXPÉDITIONS

NORVÈGE • ARCTIQUE • ISLANDE • GROENLAND • SPITZBERG

A bord d'un véritable yacht d'expédition, conçu pour 180 passagers.
Un navire à propulsion hybride, pouvant stationner sans jeter l'ancre, pour une meilleure protection des sanctuaires marins. Des conférenciers spécialistes des régions polaires présents à bord.

SA01

Voguer. Échanger. Rêver

RÉSERVEZ VOTRE CROISIÈRE AU 01 83 96 85 03 OU SUR WWW.RIVAGESDUMONDE.FR

Dominique Leglu
Directrice éditoriale

BERNARD MARTINEZ

Guerre froide, guerre chaude

Les bombes déchirent les corps, la guerre malmène les esprits. Avec l'invasion de l'Ukraine par la Russie, ceux des scientifiques sont choqués de façon singulière. Scientifiques des deux pays et de partout ailleurs. La plupart vont en effet répétant que la seule façon de progresser dans des recherches guidées fondamentalement par la curiosité, c'est en restant « ouverts au monde ». Priorité aux échanges d'où qu'ils soient, en prenant soin de distinguer régimes politiques et individus. Ce que d'aucuns taxeront de naïveté, quand d'autres y verront une capacité d'anticipation du monde d'après.

Protestation de scientifiques russes. Dès le 24 février, premier jour de l'« opération militaire spéciale », selon les termes spécieux de Vladimir Poutine, était publiée une lettre de protestation contre la guerre déjà signée par plusieurs centaines de scientifiques russes. Ils étaient 7000 huit jours plus tard. Sachant que le seul usage du mot « guerre », vite interdit, fait risquer quinze ans de prison au/à la protestataire, on veut ici saluer leur courage.

Pays paria. D'emblée, l'ampleur du déchirement fratricide les a frappés : *« Beaucoup d'entre nous avons des parents, des amis et des collègues dans des travaux scientifiques en Ukraine »*, ont écrit ces anti-guerre. Et celle du désastre au niveau mondial, la Russie se condamnant *« à l'isolement international, à la position d'un pays paria »*. Dans le même temps, a démarré l'exode depuis Kharkiv, Kiev ou Odessa, et hors des frontières, des associations, fondations, programmes, tel Pause pour l'accueil des scientifiques en urgence, ont entrepris de proposer de l'aide aux agressés. Au pays de l'agresseur, certains ont aussi commencé à se demander s'il fallait partir.

Symboles de paix. Il est légitime que les directions des grandes institutions (universités, centres de recherche…) aient annoncé des sanctions, arrêt de relations, abandon de nouveaux contrats… Mais l'avenir se joue aussi dans les laboratoires. Les plus anciens gardent le fier souvenir de la guerre froide, où des scientifiques ont joué le rôle de passerelles pour poursuivre le dialogue entre blocs. Ces laboratoires symboles de paix, tel le Cern, à Genève, laboratoire européen majeur où a été découvert le boson de Higgs, ou encore Sesame en Jordanie, apportent la preuve que des Israéliens et des Iraniens, des athées et adeptes de diverses religions peuvent travailler ensemble…

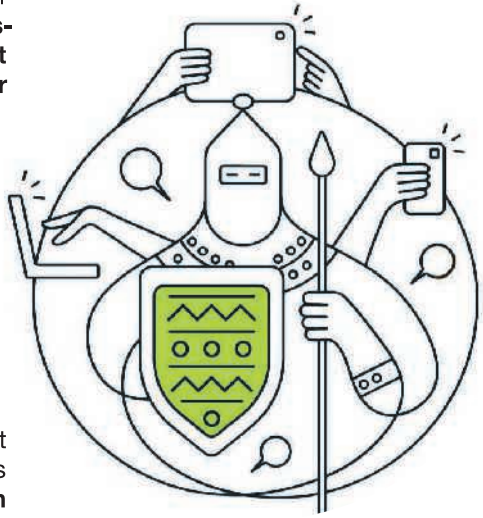
Guerre chaude. Il y a aussi, depuis plus de vingt ans, ces équipages à bord de la Station spatiale internationale où flottent de conserve Américains, Européens, Russes, Japonais… Une vraie famille internationale. En orbite jusqu'à fin mars, tournent notamment Anton Chkaplerov et Piotr Doubrov avec le Texan Mark Vande Hei. On doute qu'aucun des trois ait goûté la prétendue blague de guerre chaude, faite par Roscosmos — laisser l'Américain seul à bord. Vous avez dit ouverts au monde ? ■ @dominiqueleglu

Mieux se protéger face à la cyber-délinquance

Ceux qu'on appelle les cyber-déliquants ou plus communément les pirates visent tout aussi bien les administrations, les entreprises… que les particuliers. Les attaques sont en forte recrudescence et les cybercriminels rivalisent d'ingéniosité pour convaincre les internautes de livrer leurs données personnelles et introduire virus et malwares dans les équipements. Le point avec les experts d'Avast.

Du phishing au spoofing

Les français sont méfiants et de mieux en mieux formés. Ils détectent ainsi plus facilement les emails de phishing, ces messages comportant des appels à l'aide parfois déchirants mais souvent écrits avec de nombreuses fautes d'orthographes. Toutefois les virus et malwares s'avèrent beaucoup plus compliqués à repérer car ils **s'infiltrent discrètement dans les appareils, restant parfois inactifs avant de se propager et de déclencher l'attaque.** Si certains virus sont juste gênants, la plupart d'entre eux sont destructeurs et visent à infecter et prendre le contrôle des appareils. Ce qui peut s'avérer extrêmement facile quand l'ordinateur n'est pas équipé d'un système à jour et performant.
Les experts d'Avast rappellent que les virus se propagent de plusieurs manières : emails, téléchargements, messageries, logiciels obsolètes et messages publicitaires malveillants (malvertising). **Une bonne protection antivirus doit donc être globale et complète.**
Les techniques des cyber-criminels évoluent en même temps que nos habitudes de travail et de consommation. Ces derniers mois, le télétravail s'est généralisé avec des systèmes de sécurité parfois défaillants. L'usage des smartphones s'est également accru et ces appareils sont devenus une cible privilégiée des pirates. Quand on sait que chaque français utilise en moyenne 5 heures par jour son smarphone, il est urgent que les "mobinautes" prennent la bonne habitude de protéger leurs smarphones. Avast One propose une fonctionnalité Scam Protection qui alerte sur l'existence de liens frauduleux non seulement dans les emails mais aussi dans les SMS et applications.

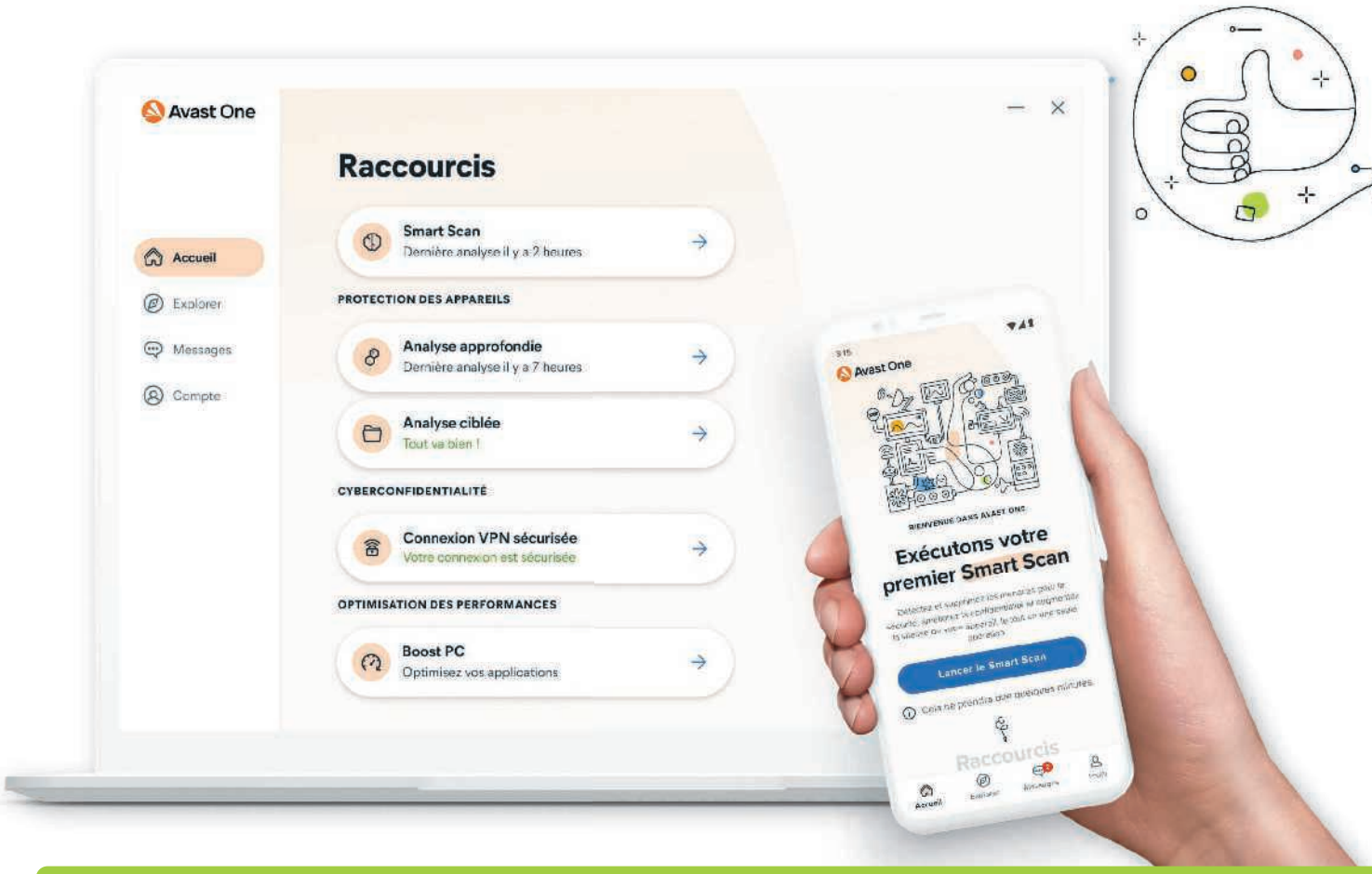


Une cyberdéliquance en hausse en 2022

Le plus vigilant des internautes est-il pour autant si démuni face à des pirates aux techniques ultra-sophistiquées ? Le spoofing (usurpation d'identité d'une marque ou d'un site de confiance) par exemple connait une forte croissance. L'escroc se fait par exemple passer pour un conseiller bancaire en fournissant des informations personnelles du "client" (numéro de téléphone, adresse). En confiance, le client s'empresse alors de communiquer le numéro de carte bancaire demandé. La protection des données personnelles est donc vitale.

Généralisation des achats en ligne, crise géopolitique, arrivée du metavers, developpement des crypto monnaies… les experts d'Avast estiment que les menaces vont aller s'accroissant et qu'elles prendront des formes très variées et difficilement détectables pour les non - initiés.
Par exemple, pour « miner » les crypto monnaies comme le bitcoin, c'est à dire résoudre de complexes équations pour des tiers, les "mineurs" utilisent des équipements informatiques à l'insu des propriétaires. A la clé une surchauffe des équipements, l'arrivée de dysfonctionnements et même une augmentation des factures d'électricité !
Tout aussi raffinés, les logiciels d'extorsion que sont les ransomware ou rançongiciels. L'ordinateur est bloqué contre rançon à verser aux déliquants. Contrairement à ce qu'on pourrait penser, PME et particuliers constituent la majorité des victimes de ransomware.

Pour bloquer toutes ces activités malveillantes, conserver la confidentialité lors des achats en ligne et faire durer les équipements, il est absolument impératif d'ajouter une couche supplémentaire de protection.



Un antivirus puissant comme Avast One sert de véritable barrière de sécurité
Téléchargez Avast One gratuitement sur votre PC sur **avast.com/sciences**

Avast One

Un antivirus gratuit primé et une solution de protection avancée

+ Des outils de nettoyage pour améliorer les performances

+ Un VPN pour plus de confidentialité

LE TOUT 100 % GRATUIT !

Et n'oubliez pas de protéger votre smartphone.

Téléchargez gratuitement Avast One sur mobile

COURRIER

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

Le nucléaire peut-il être propre ?
(*Sciences et Avenir – La Recherche* n° 901, mars 2022)

Notre dossier spécial a suscité de nombreux courriers des lecteurs. Certains nous reprochent un parti pris : *« c'est un manifeste pro-nucléaire »*, écrit Marc Muré, tandis que Bernard Lerouge pointe, à rebours, notre *« désinformation à but de propagande antinucléaire »*, Jean-Jacques Thouvenin déplorant même le *« petit côté complotiste »* de notre conclusion qui appelait à davantage de surveillance et de transparence pour la filière, à l'image de ce que fait déjà l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). Autres critiques : nous n'avons pas assez détaillé la question de certaines pollutions, des déchets, du réel bilan énergétique de la filière, des travaux du physicien Gérard Mourou, de l'histoire de Superphénix ou encore des mini-centrales, etc., ce qui montre un fort appétit de notre lectorat pour ces sujets. Il était impossible de s'étendre davantage dans ce dossier. En attendant, voici quelques précisions.

L'infographie sur l'empreinte environnementale du nucléaire comparée à celle des autres énergies est-elle orientée ?

Le choix, pour notre infographie, d'une échelle logarithmique n'a pas été fait pour minorer les performances du nucléaire, mais parce que cette graduation est la seule qui permette de montrer, sur un petit espace, une aussi large gamme de valeurs. Notre tableau reprend un travail de 2015 du Commissariat à l'énergie atomique (CEA), et plus particulièrement de Stéphane Bourg, spécialiste de l'analyse du cycle de vie (ACV), lui-même appuyé sur la base de données ecoinvent, la plus réputée au monde sur l'empreinte environnementale et les ACV.

Concernant l'empreinte terrestre, celle de l'éolien est effectivement supérieure, par rapport à la quantité d'énergie fournie, si l'on ne prend en compte que l'emplacement des fermes à éoliennes en comparaison de celui des centrales qui abritent les réacteurs. Mais notre infographie fait un bilan complet pour chaque type d'énergie, c'est-à-dire qu'il considère pour le nucléaire le cycle de vie depuis les mines d'uranium jusqu'aux sites d'entreposage des déchets radioactifs ou issus du démantèlement.

Le recyclage ultime de l'uranium français envoyé en Sibérie pourrait-il contribuer à alimenter les Russes en potentiel produit fissile pour leur arsenal nucléaire ?

L'uranium militaire nécessite un enrichissement à 90 % en isotope fissile 235, alors que l'uranium civil destiné à produire de l'énergie dans les centrales n'est enrichi qu'à 4 %. Et le groupe Orano n'envoie que de l'uranium de combustibles usés, dit de retraitement (URT), à l'opérateur russe Rosatom. Il a signé un contrat pour fournir 1150 tonnes d'uranium recyclé destiné à être converti puis réenrichi à 4 % dans l'usine de Seversk, en Sibérie. *« L'expédition de l'URT se déroule en plusieurs transports dont un premier a été réalisé début 2021 et qui devaient s'achever cette année pour ce contrat »*, indique Orano, dont le contrat avec la Russie n'a pas été dénoncé à ce jour dans le contexte de la guerre en Ukraine.

Pourquoi n'avoir pas plus parlé des réacteurs à neutrons rapides (type Superphénix) ?

Ils ont été présentés longtemps comme la voie d'avenir du nucléaire français. Et ce jusqu'à l'arrêt du projet Astrid en 2019, le dernier prototype de ce genre. La place étant comptée, il nous a semblé plus intéressant de présenter une solution d'avenir capable de brûler les déchets, les réacteurs à sels fondus (RSF).

Par ailleurs, un lecteur a noté un point commun entre Superphénix et les RSF : les sels fondus justement. La centrale de Creys-Malville (Isère) utilisait du sodium fondu, ce qui a été à l'origine de nombreux problèmes, notamment parce que l'eau et le sodium réagissent violemment lorsqu'ils sont en contact. La situation est différente pour les RSF : ils utilisent du chlorure de sodium fondu, autrement dit du sel de cuisine, qui reste inerte au contact de l'eau ou de l'air. ■

Rachel Mulot et Fabrice Nicot

Demain, préférerons-nous les univers virtuels au monde réel ? Dans son thriller psychologique ***Replay***, l'autrice et journaliste scientifique Elena Sender dépeint l'effrayant pouvoir d'attraction de la réalité virtuelle sur notre cerveau.
Elle est l'invitée du dernier épisode de ***Sixième Science***, le podcast de **Sciences et Avenir** et **20 Minutes**, à retrouver sur toutes les plateformes d'écoute.

SCANNEZ-MOI

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

À l'aube d'un bouleversement

C'est une révolution annoncée. Certains la voient se produire avant même la fin de la décennie. Les protocoles de cryptage actuels voleront alors en éclat. La finance connaîtra un bouleversement avec des transactions encore plus rapides. Des médicaments seront inventés en prédisant *in silico* le comportement des molécules qui les composeront. Tous les réseaux seront optimisés grâce à des algorithmes inédits. Etc. Cette révolution, ce sera celle de l'ordinateur quantique, qui effectuera des calculs jugés hors de portée des machines actuelles, même si celles-ci continuaient à suivre la loi de Moore selon laquelle la puissance double tous les deux ans à coût constant — ce qui n'est déjà plus le cas. Il y a quarante ans ce n'était encore qu'un concept, qui proposait de mettre à profit les propriétés les plus étranges de la physique quantique comme l'intrication, liant deux particules quelle que soit la distance qui les sépare. Mais les progrès fulgurants des physiciens l'ont rapidement rendu concret. Un premier calcul quantique fut fait en 1998. Aujourd'hui, ce sont les industriels, au premier rang desquels des géants comme IBM et Google, mais aussi des start-up non moins ambitieuses, qui prennent le relais des universitaires. Une course sans précédent pour déterminer la technique qui sera la plus à même de multiplier les qubits, successeurs quantiques des bits avec lesquels travaillent les processeurs actuels. C'est cette épopée que nous vous racontons ce mois-ci *(p. 34)*. Et ce n'est pas la seule qui dessine ce qui nous attend. Nous vous emmenons aussi dans un hôpital à Marseille où une nouvelle technique permet de soulager la douleur en stimulant directement la moelle épinière *(p. 66)*; sur différents sites industriels qui multiplient les innovations pour répondre aux engagements climatiques français *(p. 58)*; ou encore 500 mètres sous terre, dans un ancien poste de tir de la force de frappe nucléaire française reconverti en centre de recherche, qui accueillera bientôt un détecteur d'ondes gravitationnelles inédit *(p. 48)*. Plus que jamais, les sciences se conjuguent avec l'avenir. ■ @mathieu_nowak

> « L'ordinateur quantique effectuera des calculs hors de portée des machines actuelles, même en suivant la loi de Moore »

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (12 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Directrice de la rédaction Carole CHATELAIN - 01.55.35.56.57
assistée de Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Rédacteurs en chef Mathieu NOWAK (mensuel) - 01.55.35.56.38
Philippe PAJOT (La Recherche) - 01.70.98.19.29
Vincent REA (hors-série) - 01.55.35.56.35
avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Olivier LASCAR (digital) - 01.55.35.56.15
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la direction de la rédaction
Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique
Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33
Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Hugo JALINIÈRE (actualités, médecine) - 01.55.35.56.52
Rédaction Bernadette ARNAUD (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.44 - Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78
Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, Claire MATHIEU
Ont participé à ce numéro C. BELL, S. BRIET, P. BERLOQUIN, A. CARRÉ, C. COUMAU, P. KALDY, N. MAHAUT, C. PAILLASSARD
Secrétaire de rédaction
Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Maquette Horia BAHRI - 01.55.35.56.19
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Marine BENOIT (fondamental, archéologie) - 01.55.35.56.23 - Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70 - Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24 - Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15 - Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56
Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Clémence BAUDOIN - responsable projets digitaux
Jessica RIOS - cheffe de projet digital
Documentation Isabelle DO O'GOMES (cheffe de service) - 01.55.35.56.49 - Astrid SAINT AUGUSTE - 01.55.35.56.48
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Directeur général Philippe MENAT
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Christophe PERRUSSON
Publicité MediaObs. 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur délégué Philippe LÉONARD - 01.44.88.89.18
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution : Cédric AUBRY - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Sciences et Avenir SAS
Président, Directeur de la publication : Claude PERDRIEL
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL
Multimédia Sciences et Avenir, 41 bis, avenue Bosquet, 75007 Paris. - Tél. : 01.55.35.56.00

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,014 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org

FR

ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte un message « Historia », et un encart « la montre GT Mugello- Vuillemin Regnier » jetés sur couverture en diffusion partielle des abonnés. Commission paritaire n° 0625 K 79712. ISSN 00368636. Distribué par MLP.

SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

DU 12 AU 22 NOV.[1] - DU 03 AU 13 DÉC.[2]

L'ARABIE SAOUDITE

s'ouvre au Monde

C'est à une exploration de trésors archéologiques extraordinaires que Sciences et Avenir - La Recherche convie aujourd'hui ses lecteurs dans un pays qui commence tout juste à s'ouvrir aux touristes. Qui dit Arabie Saoudite pense surtout or noir et pays hermétique. Mais le royaume, de son côté, pense déjà à l'après-pétrole. D'où l'ouverture des frontières décidée dès l'année 2019, refermées pour cause de Covid19 puis ré-ouvertes, ce qui autorise ce voyage inoubliable. Spécialement pour notre groupe, des scientifiques amis de notre magazine décrypteront l'histoire du pays à travers les siècles, et tout particulièrement de la légendaire civilisation des Nabatéens, mentionnée dans la Bible et le Coran. Il sera ainsi possible de découvrir une oasis aussi renommée que celle d'Al-'Ulâ, dans la province de Médine, pour laquelle un partenariat de cinq ans avec l'Unesco a été signé à l'automne 2021 par la « Commission Royale pour Al-'Ulâ ». Un gigantesque centre de recherche en archéologie doit y être installé. Le désert de ce qui est le plus grand pays du Moyen-Orient, jadis arpenté par Lawrence d'Arabie et depuis vingt ans par d'éminentes équipes françaises d'archéologues, recèle en effet des architectures monumentales spectaculaires. Autre étonnante vision, celle des grandes villes - Djeddah, inscrite au patrimoine mondial de l'Unesco et la capitale Riyad avec son célèbre gratte-ciel pyramidal surmonté d'un globe de verre, conçu par la star de l'architecture high-tech Norman Foster. Un voyage exceptionnel en perspective.

LES POINTS FORTS

- ✓ UN VOL DIRECT PARIS - DJEDDAH / RIYAD - PARIS
- ✓ DES SITES CLASSÉS AU PATRIMOINE MONDIAL DE L'UNESCO
- ✓ 3 NUITS EXCEPTIONNELLES AU SHADEN RESORT
- ✓ L'ITINÉRAIRE LE PLUS COMPLET PROPOSÉ
- ✓ LE TRAJET EN TRAIN JUBBAH RIYAD
- ✓ LES VOLS INTÉRIEURS
- ✓ DES HÔTELS SÉLECTIONNÉS (malgré une infrastructure hôtelière pas toujours adaptée)
- ✓ UN SPÉCIALISTE DE LA DESTINATION
- ✓ DES CONFÉRENCES DANS VOS HÔTELS

DU 12 AU 22 NOV. AVEC [1]

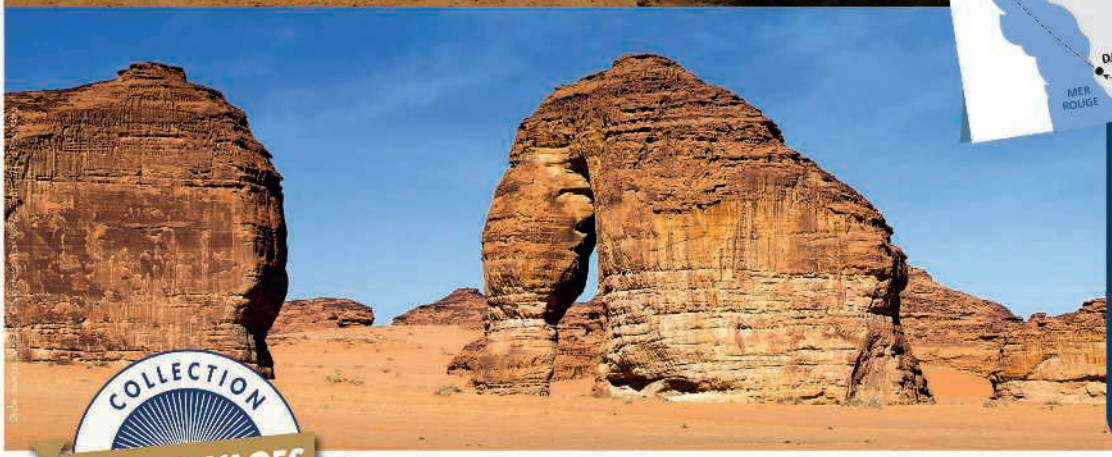
BERNADETTE ARNAUD, *grand reporter à Sciences et Avenir - La Recherche*

VINCENT CAPDEPUY
Géohistorien
Spécialiste d'histoire globale

DU 03 AU 13 DÉC. AVEC [2]

DOMINIQUE LEGLU, *directrice éditoriale de Sciences et Avenir - La Recherche*

MARIE-CHRISTINE DE WARENGHIEN
Experte de la destination Moyen-Orient a vécu plus de 12 années aux émirats.



10 JOURS / 9 NUITS

5 990€

PAR PERSONNE
EN CHAMBRE DOUBLE

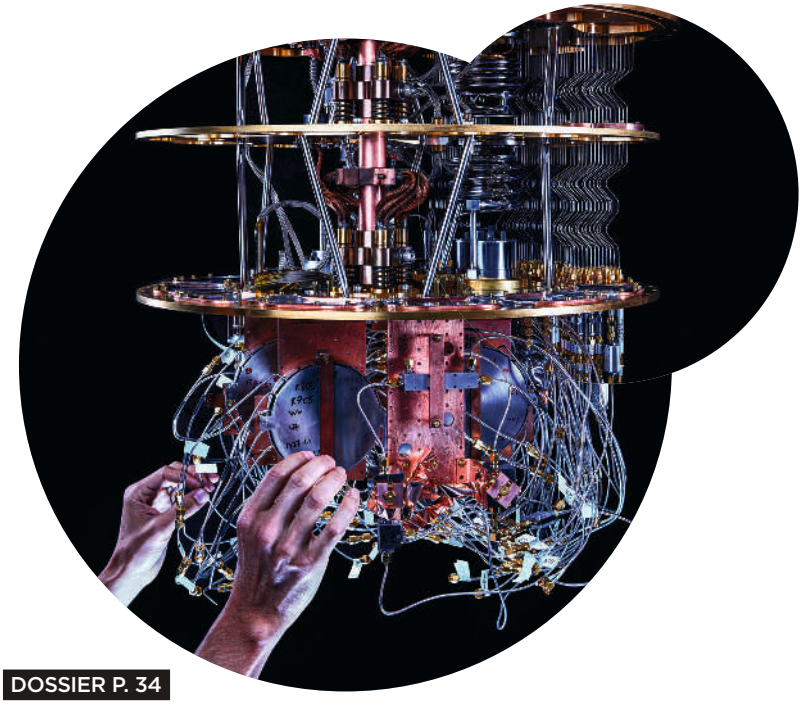
COLLECTION BLEU VOYAGES

BLEU VOYAGES | voyager@bleu-voyages.fr | TÉL. 04 72 76 75 66
www.collection-bleu-voyages.fr

Neige et Soleil Voyages SAS au capital de 396 800 € • RC Bourgoin Jallieu B 398 629 796 • Code APE 7911 Z • Immatriculation Atout France 038110038 • Agence garantie par APST • 15 Avenue Carnot - 75017 Paris • Agence assurée pour sa responsabilité civile et professionnelle par le groupe MMA Entreprises n° de contrat 144558079 • Membre du Syndicat Les Entreprises Du Voyage • Aérien • SNCF • Location Voitures • Tourisme.

SOMMAIRE

Sciences et Avenir - La Recherche / N° 902 / Avril 2022



DOSSIER P. 34

Quantique
la révolution du XXIe siècle

Géants du numérique, laboratoires de recherche et start-up sont dans la course pour développer l'ordinateur quantique, promesse d'une puissance de calcul décuplée. Les applications futures sont nombreuses : chimie, énergie, matériaux, cryptographie...

P. 10

Ukraine : missions scientifiques en danger

La guerre en Ukraine, aux conséquences humaines dramatiques, stoppe les projets scientifiques en cours avec la Russie. Le point sur les tensions dans le domaine spatial.

P. 58

Les innovations pour décarboner l'industrie

Pour tenir les engagements de la France sur la limitation des gaz à effet de serre, les filières de la sidérurgie, de la chimie, des engrais ou des pneumatiques développent des procédés bas carbone.

P. 76

Autopsie numérique d'un pharaon

Une reconstruction en trois dimensions du corps d'Amenhotep Ier a pu être réalisée sans avoir à « déballer » sa momie, fournissant des informations inédites.

3 **Éditorial** par Dominique Leglu

6 **Courrier**

7 **Édito** par Mathieu Nowak

ÉVÉNEMENT

10 **Guerre en Ukraine : coup de froid sur les missions scientifiques avec la Russie**

SCIENCES FONDAMENTALES

18 **ACTUALITÉS** La plus grande comète jamais observée se dévoile / Cet hélicoptère vole sans pilote

48 **500 mètres sous terre, la science à bas bruit**

54 **Mieux vivre avec les robots**

84 **Dossier spécial : se protéger des cyber-risques au quotidien**

NATURE

22 **ACTUALITÉS** L'urgence climatique réaffirmée / Sauvegarder le savoir des éléphants asiatiques

58 **Décarboner l'industrie : ces innovations qui rendent le pari possible**

64 **Les vers plats, nouveaux envahisseurs de nos jardins**

SANTÉ

26 **ACTUALITÉS** Les ondes cérébrales de la mort enregistrées / Des poumons universels pour la transplantation

66 **Douleur : la neurostimulation sur mesure**

70 **La cigarette électronique en plein brouillard**

74 **Nutrition : que valent les alternatives au sucre raffiné ?**

HISTOIRE

30 **ACTUALITÉS** Le fer du poignard de Toutankhamon descend des étoiles / Le mystère des brochettes de vertèbres humaines élucidé

76 **Amenhotep Ier : autopsie numérique d'un pharaon**

81 **Ces mystérieux tertres funéraires japonais**

TRANSVERSALES

88 **Sélection livres**

92 **Expositions**

93 **Le ciel d'avril**

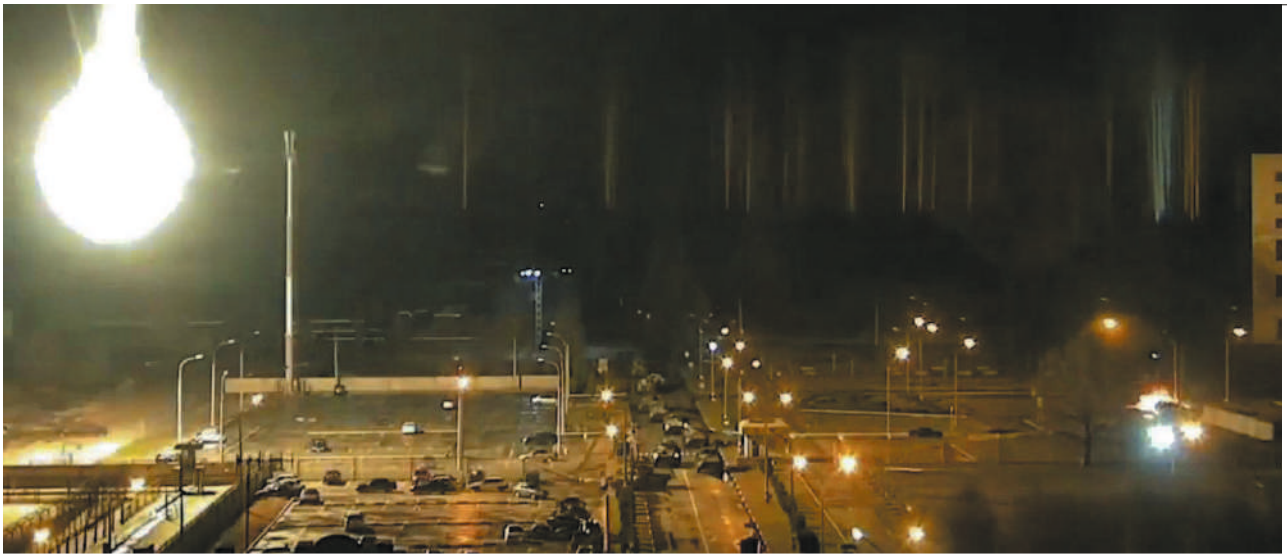
94 **Chroniques** Climat par Céline Guivarch et Christophe Cassou / Mathématiques par Claire Mathieu / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

96 **Questions de lecteurs**

97 **Solutions des jeux**

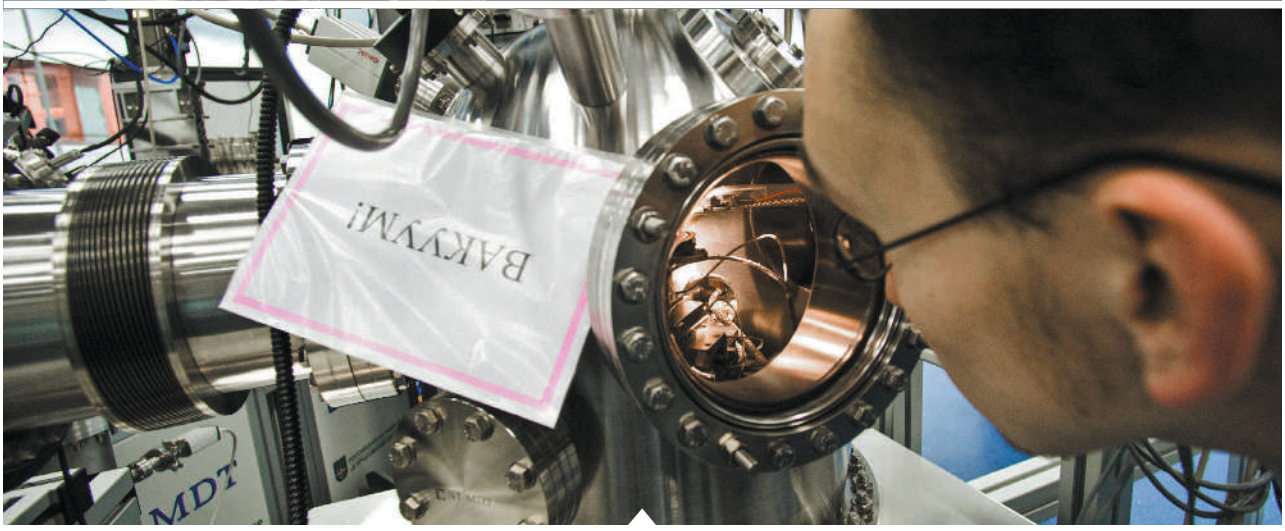
98 **Jeux**

SPENCER LOWELL/ TRUNK ARCHIVE - AFP - LYDIE LECARPENTIER/REA - COURTESY SAHAR N. SALEEM AND ZAHI HAWASS



ZAPORIZHZHIA NUCLEAR AUTHORITY/EYEPRESS/SIPA

ZUMA WIRE/ZUMA/REA



TASS/UIG/PHOTO12.COM

La sûreté des centrales nucléaires ukrainiennes (en haut, l'attaque menée par la Russie contre un bâtiment de celle de Zaporijia le 4 mars) est au cœur des préoccupations de l'Agence internationale de l'énergie atomique. **L'avenir de la Station spatiale internationale** (au centre), et **des collaborations internationales** (notamment avec l'Institut Kourtchatov de Moscou, en bas) est fortement compromis.

Guerre en Ukraine

Coup de froid sur les missions scientifiques avec la Russie

L'attaque militaire russe contre l'Ukraine a provoqué un séisme dans le monde de la recherche : nombre de projets scientifiques avec la Russie sont suspendus ou annulés, dans le domaine spatial, mais aussi avec des université russes et des instituts technologiques. Décryptage de cette crise et témoignages inédits.

Stupeur. Depuis le début de l'attaque militaire de l'Ukraine par le président russe Vladimir Poutine le 24 février, le monde entier retient son souffle. Les conséquences humaines de cette invasion sont d'ores et déjà dramatiques, avec un nombre encore largement inconnu de victimes civiles et militaires et des millions de réfugiés ukrainiens ayant fui leur pays pour échapper aux bombes. La menace d'un conflit nucléaire, qui pourrait s'étendre à d'autres nations en Europe, reste majeure à l'heure où nous écrivons ces lignes. Et la situation des centrales nucléaires attaquées — Zaporijia, la plus importante d'Europe avec six réacteurs, et Tchernobyl — fait l'objet des plus vives inquiétudes : en raison des coupures d'alimentation électrique, le risque d'une fusion du cœur des réacteurs de la première n'est pas à écarter.

Aux côtés de l'opinion publique internationale, la communauté scientifique elle aussi se mobilise, notamment avec « l'appel à la paix » lancé par 104 prix Nobel. De très nombreux scientifiques sont — à l'instar de la population civile — menacés. Guerre dans la guerre, nombre de projets scientifiques avec la Russie sont désormais suspendus ou annulés. Une situation inédite tant la coopération russo-européenne avait résisté à toutes les avanies depuis près d'un demi-siècle, particulièrement dans le secteur du spatial. C'est ce constat, en constante évolution, que nous dressons dans ces pages, la science étant aussi l'un des enjeux stratégiques de ce conflit. ■

Carole Chatelain @Carolechatelain

La coopération spatiale en berne

L'état des relations américano-russes dans le spatial est au plus mal : Moscou menace d'arrêter de maintenir l'ISS sur son orbite ; les lanceurs Soyouz ne sont plus accessibles aux Occidentaux et plusieurs programmes d'exploration sont à l'arrêt.

L'invasion de l'Ukraine par les troupes russes de Vladimir Poutine a des répercussions jusque dans l'espace. Roscosmos, l'agence spatiale russe, a en effet déclenché une salve de mesures de rétorsion en réponse aux sanctions financières et technologiques imposées par l'Union européenne et les États-Unis. La plus spectaculaire est la menace de désorbitation de la Station spatiale internationale (ISS) émise par Dmitri Rogozine, directeur général de Roscosmos *(lire son portrait ci-contre)*. Après avoir évoqué son retrait de la gestion de celle-ci après 2024, il a averti que si l'ISS était privée des poussées fournies par les cargos russes Progress et par son segment russe, elle finirait par entrer de manière incontrôlée dans l'atmosphère. Le risque de chute de la structure de plus de 400 tonnes est donc réel.

Postée en orbite basse à 400 km d'altitude, l'ISS descend en effet régulièrement sur son orbite. Il faut donc ponctuellement la réhausser et cela est fait d'ordinaire grâce aux Progress lorsqu'ils sont postés à leurs ports d'amarrage. Depuis le début d'année, quatre impulsions ont déjà été nécessaires pour regagner un total de 3,8 km. Les Progress ravitaillent par ailleurs en carburant le module de service Zvezda, qui peut assurer ces poussées lorsqu'aucun Progress n'est amarré à l'ISS. *« Si aucune manœuvre de remontée n'est effectuée, l'ISS se situera, au bout de deux ans, à une altitude critique de 278 km »*, souligne Raphaël Sart, responsable des relations extérieures au Centre national d'études spatiales (Cnes).

Mais depuis le début de la crise ukrainienne, la Nasa étudie des voies alternatives : *« Il est prévu que l'agence spatiale américaine expérimente dès avril une solution pour suppléer une éventuelle déficience russe, avec le module Cygnus NG -17 développé par Northrop Grumman et lancé le 19 février,* explique Christian Maire, chercheur à la Fondation pour la recherche stratégique. *Par ailleurs, Elon Musk a répondu aux menaces de Dmitri Rogozine en indiquant que SpaceX pourrait assurer le maintien en altitude de la station. La capsule Dragon pourrait ainsi s'amarrer à l'ISS et, couplée au module Cygnus, aurait la capacité de fournir la poussée requise »*.

Sur Twitter, Dmitri Rogozine et Elon Musk, le patron de l'entreprise américaine SpaceX, s'affrontent à coups d'invectives. Un spectacle qui cristallise l'état des relations américano-russes dans le spatial, même si cosmonautes et astronautes continuent de collaborer sans encombre dans la station. Rappelons qu'après la chute de l'URSS (1991), le programme de l'ISS a été restructuré afin de profiter du savoir-faire des ingénieurs soviétiques — développé durant les quinze ans d'existence de la station Mir — et d'empêcher qu'ils ne soient

BRUNO LEVY

« Depuis les années 2010, l'espace est pris dans les filets des enjeux globaux »

Isabelle Sourbès-Verger,
spécialiste des politiques spatiales au CNRS

SERGEI SAVOSTYANOV/TASS/SIPA

Depuis les années 1990, la France fait régulièrement appel aux lanceurs Soyouz**,** réputés très fiables (ici l'un d'eux décollant de Kourou, en Guyane).

récupérés par des nations hostiles aux États-Unis, comme l'Iran. L'ISS est ainsi devenue un symbole de coopération internationale et de paix dans l'après-guerre froide. « *Mais depuis les années 2010, l'espace est pris dans les filets des enjeux globaux et est devenu un lieu de confrontation comme un autre* », analyse Isabelle Sourbès-Verger, spécialiste des politiques spatiales au CNRS. De fait, la situation est différente de celle de 2014, lors de la crise de la Crimée, car la Nasa a gagné en autonomie vis-à-vis des Russes, avec notamment la mise en service des vaisseaux de SpaceX qui ont permis aux Américains de s'affranchir des capsules Soyouz russes pour desservir l'ISS. Exclus par ailleurs des projets lunaires américains, les Russes se voient peu à peu privés des financements occidentaux, qui tenaient jusque-là leur secteur spatial à bout de bras. « *La coopération États-Unis-Russie a perdu sa logique depuis au moins dix ans* », remarque la chercheuse. Pour l'heure, le vol retour du vaisseau Soyouz prévu pour le 30 mars est néanmoins maintenu. Il doit ramener dans les steppes du Kazakhstan l'Américain Mark Vande Hei et les deux cosmonautes russes Anton Chkaplerov et Piotr Doubrov.

Soyouz, c'est aussi le nom d'un lanceur réputé l'un des plus fiables. La France a noué depuis les années 1990 des liens privilégiés avec ce programme au travers de la société Starsem, qui commercialisait des fusées Soyouz au départ de Baïkonour (Kazakhstan), puis de Kourou (Guyane) depuis dix ans. Une alliance réussie qui vient de prendre fin.

Comment remplacer les fusées russes Soyouz et Proton ?

Le 26 février, Roscosmos a en effet annoncé la suspension des vols de son lanceur depuis Kourou, et rapatrié les 87 membres de son personnel technique présents sur la base. Orphelines de lanceur, plus d'une douzaine de missions spatiales non russes sont aujourd'hui clouées à terre, notamment des satellites de la constellation de navigation européenne Galileo, le satellite d'imagerie militaire français CSO-3, le télescope spatial européen Euclid et le satellite radar Sentinel 1C du programme d'observation de la Terre Copernicus.

Le 4 mars, c'est une constellation de fournitures d'accès à Internet qui a été brusquement freinée, cette fois à Baïkonour, Dmitri Rogozine ayant décrété « *l'arrêt de tous les lancements de fusées russes au profit de OneWeb depuis tous ses ports spatiaux* ». La raison invoquée ? L'entreprise basée à Londres (Royaume-Uni) n'a pas voulu céder aux nouvelles exigences de Moscou : à savoir la garantie que les satellites de la constellation ne serviraient pas à des fins militaires et le retrait de la participation du gouvernement britan-

PORTRAIT

Un nationaliste à la tête de l'espace civil russe

Au cœur des tensions inédites qui secouent un secteur spatial où la coopération internationale avait tenu bon depuis trente ans, figure Dmitri Rogozine, le directeur général de Roscosmos. Cet ancien chef du parti nationaliste russe Rodina est un proche de Vladimir Poutine. Il a été nommé en 2008 ambassadeur de Russie auprès de l'Otan, avant d'occuper pendant neuf ans le poste de vice-président du gouvernement de Russie. En 2018, il a finalement pris les rênes du spatial civil de la Fédération. S. R.

EXOBIOLOGIE

La mission ExoMars fortement compromise

Rosalind-Franklin, premier rover martien de conception européenne, avait passé en janvier les ultimes tests en Italie. Et devait rejoindre début avril le cosmodrome de Baïkonour (Kazakhstan) pour décoller en septembre vers la planète Rouge. Mais la guerre en Ukraine a rendu ce lancement *« hautement improbable »*, a jugé l'Agence spatiale européenne (ESA) dès le 28 février : *« Nous appliquons pleinement les sanctions imposées à la Russie par nos États membres. »* Car cette mission à 1,1 milliard d'euros est menée en étroite collaboration avec l'agence spatiale russe Roscosmos. Celle-ci fournit la fusée mais surtout l'atterrisseur censé déposer l'astromobile sur Mars. L'objectif était de rechercher d'éventuelles traces de vie dans des roches prélevées jusqu'à 2 mètres de profondeur. *« Mes pensées vont bien sûr aux Ukrainiens qui subissent les affres de la guerre,* souligne Frances Westall, exobiologiste au Centre de biophysique moléculaire d'Orléans et coresponsable d'un instrument. *Mais cela fait 25 ans que je travaille sur ce projet et je suis anéantie. »* L'avenir de la mission est désormais incertain. Le meilleur scénario serait un lancement avec la Russie fin 2024, quand s'ouvrira la prochaine fenêtre de tir. *« Mais il est impossible de savoir, aujourd'hui, quand et dans quelle mesure les coopérations pourraient reprendre avec les Russes »*, confie un expert sous couvert d'anonymat. Et si l'ESA décide de se passer d'eux, il faudra construire un nouvel atterrisseur, ce qui reporterait la mission à 2029 voire 2031. À condition d'être en mesure de le financer. **Franck Daninos**

ESA/ATG MEDIALAB

Le rover européen (ici, vue d'artiste) devait décoller pour Mars en septembre prochain depuis Baïkonour (Kazakhstan).

nique au financement de l'entreprise. Le refus de OneWeb a entraîné le débarquement immédiat des 36 satellites qui devaient être lancés cette nuit-là par une fusée Soyouz depuis le Kazakhstan. Les équipes anglaises ont immédiatement plié bagage.
Comment désormais remplacer le lanceur Soyouz et la fusée russe Proton également interdite aux pays occidentaux ? La question est d'autant plus cruciale que les gros lanceurs — Ariane 5, la japonaise H-2A et l'américaine Atlas 5 — sont en phase de retrait du marché. Et que l'interdiction d'exporter des satellites contenant des composants américains vers la Chine met au ban les fusées chinoises. Reste les engins indiens (GSLV) et les nouveaux moyens tant attendus, dont Ariane 6, qui devrait être mise sur le marché à marche accélérée. Si la Falcon 9 de SpaceX peut assurer des emports de charge importants à une fréquence soutenue, cela ne résoudra sans doute pas les problèmes de OneWeb, concurrent direct de la constellation Starlink de SpaceX…
Les représailles russes ont également visé les États-Unis, qui ne seront plus livrés en moteurs de fusée destinés pour la plupart à propulser les lanceurs Atlas. Mais les livraisons déjà effectuées ces derniers mois devraient suffire à équiper ceux-ci pour les mois à venir. *« Ils pourront voler dans l'espace sur leurs manches à balai »*, a twitté Dmitri Rogozine. Remarque à laquelle a répondu Julia Black, directrice du lancement de SpaceX, lors d'un décollage de fusée Falcon 9 le 9 mars : *« Il est temps de laisser voler le balai américain et d'entendre les sons de la liberté. »* Le ton est donné. ■ **Sylvie Rouat** @srouat1

LUNE

Incertitudes sur le programme Luna

Le gel de la coopération spatiale entre la Russie et l'Union européenne pourrait mettre à mal le programme Luna. Souffrant déjà d'une dizaine d'années de retard, il vise à réinstaller une activité scientifique russe sur la Lune — la dernière remontant à 1976 avec Luna 24 — grâce au concours de l'ESA. Une série de missions (Luna 25, 26 et 27) doivent s'envoler ainsi cette année, en 2024 et en 2025 pour satelliser une sonde lunaire et faire alunir deux engins robotisés à proximité du pôle sud. La participation de l'ESA comprend la mise à disposition de son réseau de contrôle des satellites, un système de navigation ultra-précis ainsi qu'une foreuse permettant d'analyser le sol lunaire jusqu'à 2 m de profondeur. F. D.

L'isolement soudain des scientifiques russes

« Sciences et Avenir-La Recherche » a recueilli le témoignage de scientifiques en Russie accablés par la guerre contre l'Ukraine et la fin des collaborations internationales. Nombre d'instituts occidentaux ont en effet choisi de couper les ponts avec la recherche russe.

« *Je vis un désastre personnel. Cette guerre ruine ma carrière de scientifique tout entière* », se désole Ivan*, éminent physicien à l'Institut de recherche nucléaire de Moscou. Le plus dur, pour ce sexagénaire dont on ne compte plus les publications dans de grandes revues scientifiques, n'est pourtant pas la perspective de voir son aventure collaborative avec la physique s'achever pour toujours. Non, l'expérience la plus difficile qu'il ait eue à vivre au cours de ces derniers jours, nous souffle-t-il, a été de constater qu'une partie de ses collègues — « *infime, certes, mais une partie quand même* » — approuvaient la guerre enclenchée en Ukraine par Vladimir Poutine.

7000
chercheuses et chercheurs russes se sont élevés contre l'invasion de l'Ukraine dans une lettre ouverte à Vladimir Poutine, mise en ligne le 24 février, le jour même de l'offensive militaire.

Anton, la trentaine, lui aussi physicien dans un institut de recherche moscovite, semble tout aussi sonné. « *Physiquement, nous allons bien, mais nous sommes en état de choc,* confie-t-il. *Pendant une semaine, je n'ai rien pu faire, tout comme beaucoup de mes collègues qui ont été incapables d'enseigner ou de poursuivre leurs travaux de recherche.* » Comme Ivan et nombre de ses concitoyens, il assiste, impuissant, à la mise sous cloche de son pays. Il sait aussi que pour lui, le bouleversement s'annonce plus violent encore que pour d'autres Russes dont les emplois ne dépendent pas de décisions prises à l'étranger. Lui qui n'avait jusqu'ici jamais cessé de voyager ni, bien sûr, de collaborer étroitement avec des consœurs et confrères du monde entier, se voit aujourd'hui « blacklisté » par un grand nombre d'universités et autres institutions scientifiques internationales.

En quelques jours, toute une partie du monde académique occidental a choisi de couper les ponts avec la recherche russe en signe de protestation contre la guerre en Ukraine menée par le Kremlin. Et ce malgré une lettre ouverte à Vladimir Poutine mise en ligne le 24 février sur le site de *Troitsk Variant-Science*, une publication scientifique de premier plan en Russie. Dans la missive, près de 7000 chercheurs et chercheuses russes ont condamné d'une même voix l'invasion militaire. Elle a depuis été retirée à cause de l'adoption par la Douma d'un amendement au code pénal prévoyant de fortes amendes et jusqu'à 15 ans de prison à quiconque propagerait des informations visant à « *discréditer* » les forces armées ou appelant à « *imposer des sanctions à la Russie* ».

Partenariats suspendus avec des universités russes

Saluée partout dans le monde, cette prise de position n'a cependant pas suffi à empêcher le prestigieux Massachusetts Institute of Technologie (MIT, Cambridge, États-Unis) de mettre fin, le 25 février — soit à peine 24 heures après l'attaque des troupes russes en Ukraine —, à son partenariat avec le Skolkovo Institute of Science and Technology (Skoltech), une université anglophone située dans la banlieue de Moscou. Lundi 7 mars, c'était au tour de l'Association des universités européennes (EUA) d'annoncer la suspension de sa collaboration avec 12 universités russes dont les recteurs ont affiché leur soutien

au conflit. Dans leurs déclarations, ces derniers ont souligné *« l'importance »* d'encourager l'armée et le président, qualifiant de *« devoir fondamental »* l'enseignement à leurs étudiants *« du patriotisme »*. Comme en France, les recteurs d'universités russes sont nommés directement par le chef de l'État. De quoi faire immédiatement réagir l'EUA, estimant cette prise de position *« diamétralement opposée »* aux valeurs européennes que les établissements en question *« avaient embrassées en adhérant à l'association »*.
Parallèlement, l'Allemagne, le Danemark, les Pays-Bas, la Norvège, la Suède et la Lituanie ont annoncé stopper tout projet de recherche en partenariat avec la Russie et la Biélorussie, bien que les gouvernements de ces États aient encouragé les universitaires à ne pas rompre leurs liens individuels avec les chercheurs russes. En France, le CNRS a suspendu *« toute nouvelle forme de collaboration avec la Russie »*, tout en assurant que les scientifiques russes travaillant dans des laboratoires CNRS pourront continuer à le faire.

YURI SMITYUK/TASS/ PHOTO12.COM

Prothèse bionique de la main réalisée par la société russe Motorika et l'institut moscovite Skoltech, avec qui le MIT vient de rompre son partenariat.

Un appel au boycott qui ne fait pas l'unanimité

Ces décisions répondent aussi à la demande de scientifiques ukrainiens de mettre fin expressément à toute forme de coopération avec les institutions scientifiques russes. *« Nous sommons la communauté scientifique mondiale d'arrêter immédiatement l'effusion de sang et la destruction barbare d'un pays européen civilisé »*, déclarait fin février Anatoly Zagorodny, président de l'Académie nationale des sciences d'Ukraine. Toutefois, quelques organisations scientifiques ont fait le choix de ne pas répondre favorablement à cet appel au boycott, arguant qu'un tel engagement politique desservirait la science. C'est notamment le cas de l'Union astronomique internationale ou du projet international de réacteur à fusion expérimental Iter.
Ivan comme Anton se réjouissent que le dialogue avec leurs collègues occidentaux soit pour l'instant maintenu. *« Mes confrères et consœurs se montrent jusqu'ici solidaires avec moi »*, explique le premier. Mais les choses pourraient rapidement changer. *« Certaines organisations scientifiques, notamment en Allemagne, ont coupé tous les canaux avec la Russie, même lorsqu'il s'agissait de travaux en cours,* relate Anton. *Des journaux de référence n'acceptent plus non plus les papiers d'auteurs russes. »*
La suite ? *« L'État financera uniquement les travaux destinés aux journaux scientifiques nationaux, si financements il y a encore,* redoute Anton. *Et les personnes les plus talentueuses finiront par émigrer. »* ■ **Marine Benoit** @marin_eben

* Les prénoms ont été modifiés

FRANCE

Mobilisation pour les chercheurs ukrainiens

Alors que la majorité des instituts de recherche français (CNRS, Inserm, Institut Pasteur, Inrae) ont interrompu toute collaboration avec la Russie, ils affichent en parallèle leur soutien aux scientifiques ukrainiens. Le Cern propose, par exemple, *« une assistance matérielle et un soutien psychologique ainsi qu'une collecte de fonds »*. L'Inrae *« apportera toute l'aide nécessaire à ses étudiants et contractuels impliqués dans le conflit en leur facilitant les démarches auprès de structures d'aide. »*
L'Institut Curie a annoncé *« le don de médicaments et la proposition d'accueillir et de soigner les enfants ukrainiens atteints de rétinoblastome »*. La crise actuelle donne aussi un nouvel élan au programme Pause (Programme national d'accueil en urgence des scientifiques en exil), créé en 2017 pour soutenir les chercheuses *« originaires de pays où la situation politique met leurs travaux et leurs familles en danger. »*
Son objectif : *« Par le biais de financements incitatifs, nous permettons l'accueil dans des établissements d'enseignement supérieur et de recherche en France. Nous les assistons également dans leurs démarches et accompagnons leur insertion professionnelle. »*
Le CNRS, l'Inserm, l'institut Pasteur, l'ANR, l'Inrae, l'institut Curie ou le Muséum national d'histoire naturelle adhèrent au programme. Les candidatures sont à déposer sur le site du Collège de France : **sciav.fr/902pause**

Alexandre Carré

PUBLICITÉ

Fonctionnement du cerveau

Mémoriser, raisonner, anticiper, planifier, comprendre… les capacités du cerveau sont illimitées.

Au rythme du cerveau

Le cerveau émet en permanence des ondes dont la fréquence dépend de son activité. Eveil, sommeil, phase intense de réflexion : pour chaque état cérébral, l'activité neuronale est caractérisée par un type d'onde.

Ondes alpha, bêta, gamma : leur rôle est complexe et leur émission par le cerveau dépend de nombreux facteurs, comme l'état psychologique ou encore l'alimentation.

Des études récentes ont par exemple montré le lien étonnant entre Thé vert et ondes alpha. Les feuilles de Thé vert contiennent naturellement une substance appelée L-théanine. Malgré son nom, elle n'a aucun lien avec la théine et ne provoque aucune excitation, bien au contraire. La L-théanine régule la production d'ondes alpha : en situation d'effort intellectuel prolongé, elle est capable de diminuer leur production par le cerveau, ce qui favorise la mémorisation et la concentration. À l'inverse, si le cerveau se trouve en phase d'endormissement, elle stimule leur émission, d'où un effet relaxant propice au sommeil.

Théorie des signatures

La Théorie des Signatures était une méthode d'observation dans l'Antiquité, selon laquelle l'aspect des plantes était une indication de leurs bienfaits pour le corps. La science moderne a depuis confirmé l'efficacité de certaines plantes sur la partie du corps à laquelle elles ressemblent. Ainsi débarrassée de sa coque, la Noix ressemble fortement à un cerveau. Elle est riche en Omegas et en antioxydants, et plusieurs études ont montré ses bienfaits sur la mémoire.

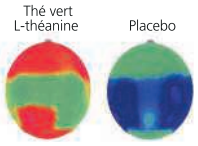
Indispensable irrigation

Le cerveau est incapable de constituer des réserves, et doit donc être alimenté en permanence en glucose. Celui-ci est apporté grâce à un vaste réseau de capillaires, de petits vaisseaux sanguins qui permettent d'irriguer efficacement l'ensemble du cerveau. Leurs fines parois laissent passer le glucose mais aussi l'oxygène indispensable au bon fonctionnement du cerveau. En effet, quelques minutes seulement sans oxygène y entraîne des lésions irréversibles. Là encore, l'alimentation et le mode de vie en général jouent un rôle primordial. La consommation d'aliments riches en antioxydants qui protègent les capillaires, et plus spécifiquement en polyphénols, influence directement le fonctionnement cérébral. Les recherches convergent notamment sur le Pin maritime, dont l'écorce renferme de grandes quantités de proanthocyanidines ou OPC, des polyphénols capables de stimuler la microcirculation sanguine dans les capillaires.

B comme bénéfiques

Le cerveau utilise aussi une multitude de vitamines et minéraux pour fonctionner. Un apport suffisant en vitamines B est particulièrement bénéfique pour maintenir des fonctions cognitives normales (mémoire, concentration, attention). La vitamine B5 par exemple est essentielle à la production de neurotransmetteurs, des substances chimiques qui permettent aux signaux électriques de passer d'un neurone à l'autre pour faire circuler l'information.

Le cerveau passé au scanner



L'activité cérébrale peut être observée grâce au scanner qui met en évidence les zones activées en fonction de l'état dans lequel se trouve le cerveau. La consommation de L-théanine (en rouge) active les zones de la mémoire et de la concentration. Sans L-théanine, ces zones restent inactives (en bleu). Les nombreux travaux de recherche effectués sur le fonctionnement du cerveau ont permis de mettre au point des solutions pour améliorer les fonctions cognitives et les performances intellectuelles. Le laboratoire de recherche végétale New Nordic a mis au point une formule complètement naturelle à base de plantes et vitamines. Baptisée **Cerveau Clair**, elle contient des extraits concentrés de Thé vert, de Noix, de Pin maritime et de Grenade, associés à des vitamines et de l'Iode pour optimiser les performances cérébrales. Ces actifs sont capables d'atteindre le cerveau en quelques heures et sont efficaces sur le long terme. Ils sont donc indiqués pour stimuler les capacités intellectuelles, la concentration et la mémoire, notamment en période de révisions ou d'examens, mais aussi pendant des programmes de plusieurs mois. Les actifs de **Cerveau Clair** atteignent rapidement le cerveau, pour une efficacité en moins d'une heure. Réservé aux adultes de plus de 15 ans.

Des conseils ?

Les experts New Nordic vous répondent au 01 89 16 12 19 ou sur **www.vitalco.com**

Disponible en pharmacie

Cerveau Clair 60 cp est disponible grâce au code **ACL 295 18 63**

NOIRLAB/NSF/AURA/J. DA SILVA

La mesure de la géante a été effectuée à partir de son albédo, la quantité de lumière qu'elle réfléchissait au moment de son observation (vue d'artiste).

La plus grande comète jamais observée se dévoile

Le diamètre de Bernardinelli-Bernstein, découverte en 2021, vient d'être établi à 137 km.

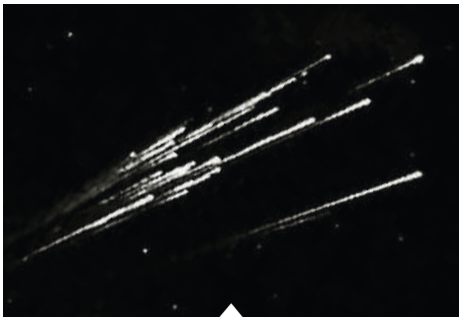
Un monstre d'un diamètre de 137 km ! Bernardinelli-Bernstein est bien la plus grande comète jamais observée. C'est près du double de la précédente détentrice du record, Hale-Bopp (74 km). La mesure a été réalisée par des chercheurs de l'observatoire de Paris et de l'Institut d'astrophysique d'Andalousie (Espagne) à l'aide du radiotélescope Alma, au Chili. Ils ont pour cela analysé la quantité de lumière réfléchie (l'albédo) par la comète en août 2021, alors qu'elle se trouvait à 20 unités astronomiques du Soleil (1 UA = distance Terre-Soleil, soit environ 150 millions de kilomètres). C'est la plus lointaine mesure d'albédo d'une comète jamais réalisée. La même technique permettra de mesurer régulièrement sa taille tandis qu'elle se rapprochera du Soleil et que sa glace se sublimera (atteindra l'état gazeux sans passer par l'état liquide). Lorsqu'elle entamera son voyage retour vers les confins du Système solaire pour ne revenir que dans 2,9 millions d'années, elle pourrait ainsi ne plus faire que la moitié de sa taille actuelle.

Elle sera au plus près du Soleil en 2031

Cette géante a été découverte en 2021 par le Brésilien Pedro Bernardinelli, alors doctorant à l'université de Pennsylvanie (États-Unis) sous la direction de l'Américain Gary Bernstein, membre du Dark Energy Survey. Ce programme international cartographie en optique et en infrarouge des centaines de millions de galaxies afin de comprendre la nature de l'énergie noire. Le jeune chercheur analysait numériquement les archives du programme — soit près de 700 millions d'images d'étoiles et de galaxies — afin de recenser les objets du Système solaire externe. Il a ainsi pu identifier plus de 800 objets transneptuniens… et cette colossale comète !
Les simulations orbitales indiquent qu'elle provient du nuage d'Oort, un réservoir de corps glacés qui s'étendrait à une distance d'une à deux années-lumière du Soleil. En 2014, lorsqu'a été pris le cliché, la comète croisait dans la région de Neptune à 4,3 milliards de kilomètres du Soleil. Bernardinelli-Bernstein devrait s'approcher au plus près de notre étoile le 21 janvier 2031, à 11 unités astronomiques, une distance à laquelle elle ne s'est encore jamais aventurée, ce qui en fait la comète la plus primitive jamais observée, susceptible ainsi de fournir des informations sur l'enfance du Système solaire. Elle restera toutefois invisible à l'œil nu à cette distance du Soleil. ■ **S. R.**

Sale temps pour Starlink

ESPACE La tempête solaire qui a frappé la Terre début février a été fatale à 40 des 49 satellites de la constellation américaine Starlink (SpaceX) lancés le 3 février. Les bouffées de particules en provenance du Soleil ont modifié la température et la densité de l'air, perturbant la trajectoire des satellites. Incapables de rejoindre leur orbite, ils se sont consumés quelques jours plus tard dans l'atmosphère. **F. N.**



SOCIEDAD DE ASTRONOMIA DEL CARIBE/YOUTUBE

Des débris des satellites détruits en raison d'une tempête solaire ont été vus dans le ciel de Puerto Rico.

240 m/s
La vitesse du son sur Mars

PHYSIQUE Grâce à un microphone conçu en France et installé sur Perseverance, le dernier rover martien de la Nasa, des scientifiques ont pu enregistrer les ondes de choc provoquées par un laser frappant la roche, et établir pour la première fois la vitesse du son sur Mars à 240 m/s. Ce qui est plus lent que sur Terre (340 m/s), en raison de températures plus froides et d'une pression atmosphérique plus basse. **H. J.**

SOURCE : B. CHIDE, LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY, ÉTATS-UNIS.

SHFAQAT ABBASKHAN

Découvert en 2015 sous le glacier Hiawatha, le cratère mesure 31 kilomètres de large.

Le cratère géant du Groenland prend un coup de vieux

GÉOLOGIE L'immense cratère d'impact de 31 km de diamètre découvert en 2015 sous le glacier Hiawatha, au nord-ouest du Groenland, a été daté de 58 millions d'années. Très loin des 13 000 ans évoqués lors de sa découverte ! C'est un astéroïde d'environ 1 à 2 km de diamètre qui aurait laissé là sa marque en libérant une énergie équivalente à environ 50 millions de fois celle de la bombe d'Hiroshima. **H. J.**

SOURCE : GAVIN G. KENY, MUSÉE SUÉDOIS D'HISTOIRE NATURELLE.

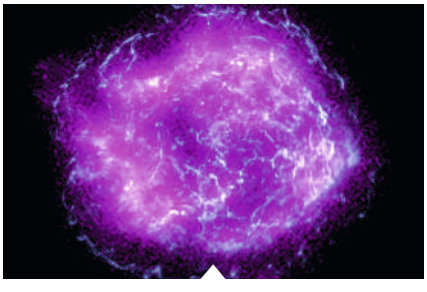
EN DEUX MOTS

EXOPLANÈTE Les astronomes ont détecté une nouvelle planète orbitant autour de l'étoile Proxima du Centaure, la plus proche du Système solaire, à la limite de la zone d'habitabilité. **LUNE** Les restes d'une fusée présumée chinoise en déshérence depuis 2014 se sont écrasés sur la face cachée de la Lune. **TRANSPORT** La société américaine Virgin Hyperloop annonce que son projet de train hypersonique n'embarquera finalement pas de passagers mais sera réservé au fret, expliquant ce revirement par l'impact de la pandémie.

Un nouveau satellite capte les restes d'une étoile

Lancé en 2021, cet instrument est destiné à l'observation des rayons X qui se propagent dans l'espace.

C'est le rémanent Cassiopée A — restes de l'explosion d'une étoile — qu'a ciblé le satellite IXPE (the Imaging X-ray Polarimetry Explorer) de la Nasa pour sa toute première image scientifique. Lancé en décembre 2021, ce nouvel instrument est destiné à l'observation des rayons X qui se propagent dans l'espace. Habituellement, la lumière oscille sans direction précise, mais sous l'effet de puissants champs magnétiques, elle peut être polarisée et adopter une orientation privilégiée. Ces champs sont générés par les structures les plus énergétiques du cosmos, et l'étude de la variation de la polarisation des rayons X permet de les identifier. Ainsi, les scientifiques espèrent percer le secret de Cassiopée A, qui a explosé au XVII[e] siècle sous la forme d'une supernova. La Voie lactée affiche toujours les traces de cette explosion, qui forment une immense bulle de gaz et de matière de 10 années-lumière. **J. I.**



NASA/CXC/SAO/IXPE

Image composite du rémanent de supernova Cassiopée A réalisée avec les données de IXPE (en violet) et du télescope Chandra (en bleu).

Le « deepfake », un faux visage qui inspire la confiance

INFORMATIQUE Non seulement il est ardu de distinguer, en photo, un vrai visage d'un visage généré par intelligence artificielle *(deepfake)*, mais les seconds ont tendance à inspirer davantage confiance que les premiers ! Mieux (ou pire) : trois des quatre visages notés comme les plus fiables par les participants à une étude étaient des *deepfakes*, tandis que ceux censés le moins inspirer confiance étaient tous vrais. **A. D.**

SOURCE : SOPHIE J. NIGHTINGALE, UNIV. DE LANCASTER, ROYAUME-UNI.

SOPHIE J. NIGHTINGALE ET AL.

Ce visage généré par un algorithme a été attribué à une vraie personne.

Cet hélicoptère vole sans pilote

L'engin gère de façon autonome des manœuvres critiques comme le décollage et l'atterrissage.

DARPA

L'appareil a pu décoller, éviter des obstacles virtuels et atterrir sans encombre.

C'est une première : dans le cadre du programme Alias (Aircrew Labor In-Cockpit Automation System), l'agence de recherche de l'armée américaine, la Darpa, a réussi à faire voler un UH-60A Black Hawk sans aucun membre d'équipage. La démonstration a eu lieu à Fort Campbell, dans le Kentucky, durant 30 minutes. Mené à une vitesse normale, entre 185 et 200 km/h, le vol a permis de montrer l'aptitude du système à gérer diverses manœuvres, dont celles, critiques, du décollage et de l'atterrissage. Par le biais de données cartographiques envoyées aux capteurs et simulant la présence d'obstacles dans un espace urbain, l'hélicoptère a pu progresser sans encombre dans cet environnement virtuel. Les opérations étaient supervisées par vidéo depuis une base au sol mais sans intervention humaine sur les commandes. **A. D.**

A. ROUXEL ET AL., IEMN, PHYS. REV. FLUIDS/APS

La doyenne des bulles n'a éclaté qu'au bout de 465 jours.

La bulle la plus longue

PHYSIQUE **Du jamais vu : des physiciens lillois ont fabriqué des bulles dont l'une a survécu 465 jours ! Large de 8 millimètres, cette doyenne était composée d'eau, de glycérol et de microparticules de plastique permettant de réduire les écoulements d'eau qui rendent les bulles classiques si éphémères. Le glycérol, lui, absorbe l'eau atmosphérique pour compenser les pertes dues à l'évaporation.** **F. D.**

SOURCE : AYMERIC ROUX, UNIVERSITÉ DE LILLE, FRANCE.

Un plastique plus résistant que l'acier

CHIMIE Un matériau ultrarésistant mais aussi léger que le plastique a été fabriqué par des chimistes, à partir de petites molécules qui s'agrègent sur un même plan pour former des disques de quelques milliardièmes de mètre d'épaisseur. Ces films s'assemblent ensuite spontanément par le biais de liaisons hydrogène. Résultat : une structure deux fois plus résistante que l'acier mais six fois moins dense. **F. D.**

SOURCE: YUWEN ZENG, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, ÉTATS-UNIS.

La Lune reproduite sur Terre

EXPLORATION Afin d'entraîner les astronautes et de tester de nouvelles technologies pour de futures missions lunaires, le Centre européen des astronautes à Cologne (Allemagne) va lancer, au deuxième trimestre, la construction d'une nouvelle installation. Nommée Luna, elle disposera d'un module d'habitation et d'un banc d'essai de 700 m² simulant la poussière lunaire et reproduisant les conditions d'éclairage à la surface de la Lune. **S. R.**

ESA/DLR-F. ROMETSCH

Les voyages du SAVOIR

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

Des voyages exceptionnels pour voir, apprendre et comprendre

NANTES, sur les pas de Jules Verne

Du 7 au 10 juin 2022

En compagnie de

MARC LACHIÈZE-REY
Astrophysicien, théoricien et cosmologue

SYLVIE ROUAT
Grand Reporter à Sciences et Avenir-La Recherche, spécialiste espace et océanologie

Un séjour de 3 nuits et 4 jours dans la ville natale de Jules Verne.

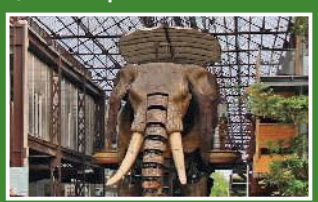
A partir du Novotel Centre Gare **** où vous logerez vous visiterez la ville où Jules Verne a passé les vingt premières années de sa vie et où il a trouvé le goût de ces **voyages extraordinaires** dont son œuvre est constituée et qui l'ont rendu universellement célèbre.

Au programme : le **musée Jules Verne**, **l'île des machines**, Saint-Nazaire et **les Chantiers de l'Atlantique**, **les Ateliers d'Airbus**, témoins du dynamisme de la ville, qui à chaque étape de son histoire a su conserver, mettre en valeur et le cas échéant transformer son patrimoine. Vous visiterez aussi **le château des Ducs de Bretagne** et son **musée de l'Histoire de Nantes**, les magnifiques **immeubles du XVIII^e^ s. de l'ile Feydeau** qui, eux, attestent de son riche passé de grande ville portuaire.

Vous écouterez **les conférences de Marc Lachièze-Rey** inspirées de l'œuvre visionnnaire du grand écrivain.

Vous pourrez échanger autour de votre magazine avec **Sylvie Rouat** au cours de ce séjour accompagné et animé par **Marc Saugier** organisateur des Croisières et Voyages du Savoir. ■

Prix du voyage : 1 170 € par personne, tout compris de Nantes à Nantes



ATAPUERCA, ALTAMIRA

évolution de l'humanité, évolution de l'art

du 26 au 30 septembre 2022

En compagnie de

JEAN-MICHEL GENESTE
Archéologue

YVES COPPENS
Paléoanthropologue

ANDREINA DE BEI
Rédactrice en chef adjointe (photo) de Sciences et Avenir-La Recherche

Un séjour de 4 nuits et 5 jours en Cantabrie (Espagne).

Le site **d'Atapuerca** près de Burgos (Espagne) est une mine d'or pour les paléoanthropologues. C'est dans ce lieu unique qu'évolua le plus ancien humain connu d'Europe de l'Ouest (Homo antecessor, **plus d'un million d'années**).

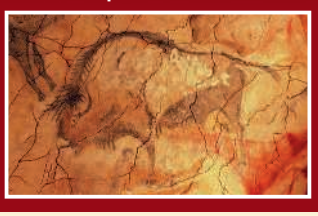
Altamira, « l'autre Sixtine de la préhistoire » est historiquement la première grotte ornée qui ait été découverte et publiée (1879). Avec Lascaux et Chauvet, Altamira forme la trilogie des grottes ornées les plus celèbres d'Europe occidentale.

Qui mieux que ces deux spécialistes de renommée mondiale que sont **Yves Coppens** et **Jean-Michel Geneste** pourraient nous faire les honneurs de ces deux sites majeurs pour l'évolution de l'humanité et celle de l'art ? **Chaque soir une de leur conférence mettra en perspective les visites de la journée**.

Au programme : **Burgos** : les fouilles d'Atapuerca, le musée de l'évolution humaine ; **Puente Viesgos** : les grottes del Castillo ; **Santillana del Mar** : la réplique de la célèbre grotte d'Altamira ; **Santander** : le musée d'archéologie et d'histoire de la Cantabrie ; **Bilbao** : le musée Guggenheim.

Vous aurez plaisir à dialoguer avec **Andreina De Bei** au cours de ce voyage accompagné et animé par **Marc Saugier** organisateur des Croisières et Voyages du Savoir. ■

Prix du voyage : 1 535 € par personne, tout compris de Bilbao à Bilbao



Organisation technique BLB TOURISME

PROGRAMME RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS :

blb-tourisme.bzh/voyages-du-savoir

BLB TOURISME Zone de KERBOIS 15, Rue Yves de Kerguelen 56400 AURAY
Tél : 02 97 56 60 86 Courriel inscription@blb-tourisme.com

JEAN-PHILIPPE DELOBELLE / BIOSPHOTO

L'agroforesterie, qui associe plantations d'arbres et cultures, permet de limiter les effets néfastes des fortes chaleurs sur les récoltes (ici au Mali).

L'urgence climatique réaffirmée

Le dernier rapport du Giec rappelle la nécessité d'une adaptation rapide au changement climatique.

Le réchauffement climatique devrait causer 30 000 décès par an en Europe d'ici 2050, dont 4000 rien qu'en France. C'est l'un des terribles constats que fait le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) dans son dernier rapport « Impacts, adaptation, vulnérabilité » *(lire aussi p. 94)*. Très attendu, il a été éclipsé par l'invasion russe en Ukraine. Son importance est pourtant capitale car il pose la question des conséquences du réchauffement actuel de 1,1 °C depuis 1850, qui place déjà 3,3 à 3,6 milliards d'humains dans un contexte de forte vulnérabilité, et interroge sur sa poursuite à +2 °C voire +2,7 °C. En voici les points saillants.

Bouleversements de la biodiversité. La hausse des températures est à l'origine de la détérioration des écosystèmes et de leur capacité naturelle à s'adapter. Les saisons étant modifiées, les plantes germent et fleurissent plus tôt, tandis que les animaux se déplacent vers des zones plus septentrionales. Les coraux, eux, subissent des pertes qui pourraient déjà être irréversibles.

Baisse des rendements agricoles. Après des décennies d'augmentation des rendements, les températures élevées ont ralenti ces progrès voire les ont stoppés, comme pour le blé en France depuis le milieu des années 1990. Certaines régions plus près des Pôles ont bien « profité » de la hausse et d'une plus grande teneur de CO_2 favorisant la photosynthèse. Mais le bilan global est négatif. De plus hautes températures provoquent en effet un appauvrissement des sols et l'affaiblissement des moussons affecte les agricultures tropicales.

L'accès à l'eau menacé. La disponibilité en eau est menacée pour plus de la moitié de l'humanité. Avec une hausse de 2 °C, l'eau provenant de la fonte de la neige disponible pour l'irrigation devrait diminuer de 20 % dans les bassins fluviaux alimentés par les chutes hivernales en montagne, un phénomène accentué par la perte de masse des glaciers estimée à 18 %.

Des canicules mortelles. Les maladies, mais aussi les morts prématurées, ont déjà augmenté et ce phénomène va perdurer, notamment à cause des vagues de chaleur plus fréquentes, y compris en Europe où les canicules vont provoquer de plus en plus de morts. Les maladies vectorielles (dengue, chikungunya, paludisme…) vont se répandre du fait de l'augmentation de l'aire de répartition des moustiques vecteurs.

Des îles en voie d'extinction. La population mondiale susceptible d'être affectée par la hausse du niveau des mers va dépasser le milliard d'individus au milieu du siècle. L'existence même des petites îles est menacée. ■ **L. C.**

Sauvegarder le savoir des éléphants asiatiques

Un programme vise à compiler les recettes à base de plantes qui servent aux pachydermes pour se soigner.

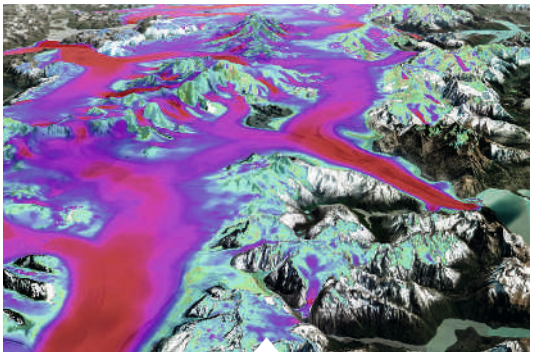
PATRICE TERRAZ/DIVERGENCE

114 espèces végétales, ingrédients des remèdes connus de ces grands mammifères, ont été inventoriées.

La pharmacopée des éléphants domestiques du Laos est menacée, alerte l'Institut de recherche pour le développement (IRD). Ces animaux savent en effet se soigner en consommant différentes plantes qu'ils trouvent dans les forêts. Mais alors qu'ils ont longtemps été utilisés pour les travaux de force, les pachydermes sont aujourd'hui peu à peu remplacés par des engins mécaniques. Par conséquent, ils retournent à la captivité et n'ont plus accès aux végétaux qu'ils ont l'habitude de consommer. Aussi, Jean-Marc Dubost, ethnobiologiste à l'IRD, a entrepris d'établir avec les universités laotiennes les recettes à base de 114 racines et écorces connues des éléphants. L'objectif, à terme, est de soigner les animaux en captivité avec des méthodes naturelles quand cela est possible. **P. K.**

EN DEUX MOTS

BIODIVERSITÉ Leurs territoires étant ravagés par les mégafeux, les koalas sont déclarés « espèce en danger » dans trois États de l'Est australien. **MÉTÉO** Le bulletin mensuel des tendances climatiques de Météo-France annonce un début de printemps plus chaud et plus sec que la normale. **POLLUTION** L'assemblée pour l'environnement de l'ONU a lancé des négociations pour un traité « historique » juridiquement contraignant contre la pollution plastique, à adopter d'ici à 2024.



IGE-CNRS / MAPBOX / OPENSTREETMAP @MAXAR

Voies d'écoulement (en rouge) du glacier Upsala (Patagonie).

Les glaciers sont moins épais que prévu

GLACIOLOGIE La quantité d'eau contenue dans les glaciers de la planète serait inférieure de 20 % à celle estimée jusqu'à présent. C'est la conclusion d'une vaste analyse de la vitesse d'écoulement de 200 000 glaciers réalisée à partir de 800 000 images à haute résolution acquises par deux satellites entre 2017 et 2018. Moins épais que prévu, les glaciers devraient donc disparaître plus tôt qu'attendu. **H. J.**

SOURCE : R. MILLAN, UNIVERSITÉ DE COPENHAGUE, DANEMARK.

17,6 mètres

La hauteur d'une vague scélérate extrême

OCÉANOGRAPHIE Si d'autres vagues scélérates ont déjà été mesurées jusqu'à 34 m, celle enregistrée sur la côte pacifique du Canada bat un record de proportionnalité : sa hauteur était près de trois fois supérieure à la houle qui l'entourait (6 m). C'est sans précédent pour ces murs d'eau, définis par une hauteur au moins deux fois supérieure aux vagues alentour. **M. B.**

SOURCE : J. GEMMRICH, UNIVERSITÉ DE VICTORIA, CANADA.

Les chiens aussi font leur deuil

ÉTHOLOGIE Activité réduite, moindre appétence au jeu, besoin d'un surcroît d'attention… Voici quelques changements comportementaux observés chez les chiens après la perte d'un congénère proche. C'est ce que révèle une étude menée auprès de 420 propriétaires d'au moins deux chiens, dont l'un était mort et l'autre resté en vie. Ce deuil était noté dans 86 % des cas. **A.-S. T.**

SOURCE : STEFANIA UCCHEDDU, UNIVERSITÉ DE MILAN, ITALIE.

ARDEA / JOHN DANIELS / BIOSPHOTO

La mort d'un congénère proche affecte le comportement canin.

ALBA MOTES-RODRIGO

QUESTIONS À

Alba Motes Rodrigo

Chercheuse au département d'écologie et évolution de l'université de Lausanne (Suisse)

Des orangs-outans utilisent des outils coupants

Des chercheurs ont observé pour la première fois l'utilisation d'outils coupants en pierre par deux orangs-outans *(Pongo pygmaeus)* du zoo de Kristiansand, en Norvège, sans apprentissage préalable auprès d'humains.

Qu'avez-vous observé précisément ?
Les deux grands singes n'ont pas produit d'objets coupants à dessein, mais ils ont été capables d'en identifier pour les utiliser spontanément afin de trancher l'emballage en silicone de leur nourriture. Pourtant, cette espèce de singe n'a jamais été vue utiliser des outils en pierre dans la nature. Et en captivité, ce comportement n'avait jamais été signalé chez un singe non entraîné. Mais cela prouve qu'il peut reconnaître d'instinct des pierres pointues comme outils de coupe.

Quel enseignement peut-on en tirer ?
Cela laisse d'abord supposer que cette habileté pourrait être plus répandue que nous ne le pensions chez les primates. Nous faisons l'hypothèse que cette compétence était peut-être déjà présente chez le dernier ancêtre commun à *Homo* et *Pongo*, deux lignées qui ont divergé il y a environ 13 millions d'années.

Comment confirmer ces premières observations ?
Avec seulement deux individus, ce n'est certes qu'un début. Mais c'est déjà une première preuve qu'au moins certains orangs-outans peuvent acquérir cette aptitude sans aide. Compte tenu de la taille de notre échantillon, des questions demeurent : y a-t-il un âge optimal pour innover de cette façon ? D'autres singes pourraient-ils apprendre de leurs congénères ? Et d'autres espèces peuvent-elles faire de même ? Il faudra par exemple mener des études du même type avec des bonobos. ■

Propos recueillis par C. B.

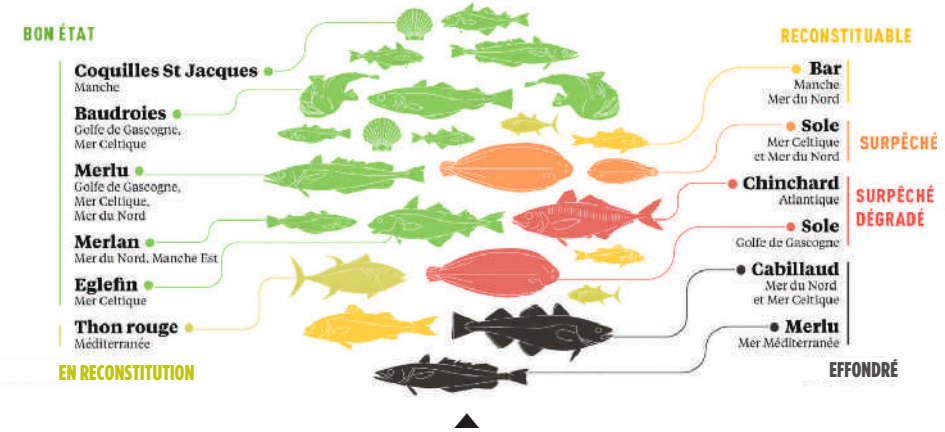
Le grillon australien a la morsure la plus puissante

ENTOMOLOGIE Coléoptères, termites, guêpes, fourmis d'Asie, d'Europe ou d'Amérique… Sur 654 espèces d'insectes testées, c'est *Chauliogryllacris acaropenates,* un grillon des forêts humides du nord-est de l'Australie, qui a les plus fortes mandibules. Une nécessité pour cette espèce obligée de mordre dans le bois vivant pour y creuser ses nids.

SOURCE : PETER THOMAS RÜHR, UNIVERSITÉ DE BONN, ALLEMAGNE.

Sur les 654 espèces étudiées, c'est cet insecte qui mord le plus fort.

UNIVERSITÉ DE BONN



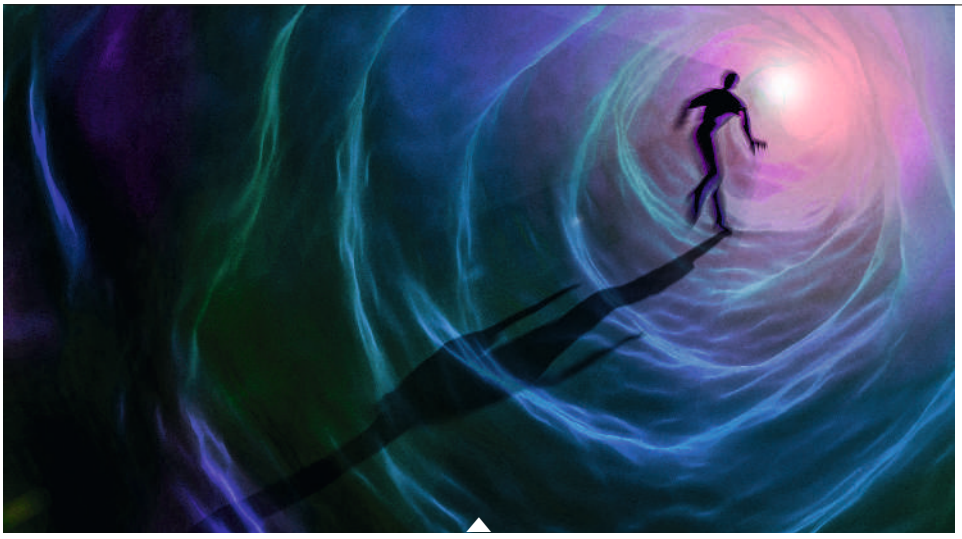
Si les populations se reconstituent davantage, certaines espèces restent très affectées par la surpêche.

Les stocks de poissons se reconstituent

HALIEUTIQUE Le bilan annuel réalisé par l'Ifremer sur l'état des populations de poissons vendus sur les étals montre que 56 % des stocks pêchés et consommés en France sont exploités de façon durable, contre 15 % il y a vingt ans. Toutefois, la surpêche touche encore 11 % des populations et certaines espèces sont toujours considérées comme « effondrées », à l'instar du merlu en Méditerranée, ou du cabillaud en mer du Nord et en mer Celtique. **L. C.**

IFREMER

Évasion
HANDICAP
famille
evasion-handicap-famille.fr
Contactez-nous au :
01 44 72 45 10
PARTIR EN VACANCES AVEC
LE PROCHE QUE VOUS AIDEZ...
C'est possible !
14 destinations vacances partout en France.
Des activités variées pour toute la famille.
Des logements adaptés aux besoins spécifiques de chacun.
Des animateurs qualifiés pour prendre en charge votre proche en toute sécurité.
Projet porté par
UFCV
VVF
© Getty Images



MARK GARLICK/ SCIENCE PHOTO LIBRARY/ SUCRÉ SALÉ

Une mort imminente pourrait conduire le cerveau à réaliser un dernier rappel de souvenirs avant de s'éteindre.

Les ondes cérébrales de la mort enregistrées

L'activité électrique du cerveau captée au moment du décès d'un patient suggère un ultime rappel de la mémoire.

À l'orée de la mort, le cerveau pourrait bien faire défiler des souvenirs marquants de la vie, comme cela est parfois rapporté dans les récits d'expérience de mort imminente. C'est ce qu'affirme une équipe internationale de neuroscientifiques qui a eu une occasion unique d'observer la mort en face, grâce à l'enregistrement des ondes cérébrales d'un patient au moment où celui-ci passait de vie à trépas.

Ce cas clinique rapporté dans *Frontiers in Neuroscience* concerne un homme de 87 ans s'étant présenté à l'hôpital général de Vancouver, au Canada, pour un traumatisme crânien léger à la suite d'une chute. Après deux jours d'amélioration, il est pris de crises semblables à de l'épilepsie, faites de secousses et de paralysies. Son cerveau est alors surveillé par électroencéphalographie (EEG). Les électrodes placées sur le cuir chevelu vont en enregistrer l'activité électrique en continu pendant 900 secondes ; avant, et un peu après le décès du patient par arrêt cardiaque. Sur ces 15 minutes d'enregistrement des ondes cérébrales, les chercheurs ont ainsi pu étudier les 30 secondes précédant et suivant l'arrêt du cœur.

Une étude qui ne porte que sur un cas

« L'analyse a révélé que le cerveau générait des oscillations cérébrales similaires à celles qui sont observées pendant le rêve et le rappel de la mémoire, écrivent les chercheurs. *Nos données fournissent pour la première fois une preuve que le cerveau humain peut avoir la capacité de générer une activité coordonnée au moment de s'éteindre.* » En l'occurrence, un processus de récupération rapide de la mémoire. *« En générant de telles oscillations cérébrales, le cerveau réalise peut-être un dernier rappel des événements importants de la vie d'une personne avant de mourir »*, interprète Ajmal Zemmar, qui a dirigé ces travaux.

La portée de cette étude doit toutefois être pondérée : les lésions neurologiques dont souffrait le vieil homme pourraient avoir interféré avec l'analyse des signaux captés par l'EEG. Surtout, il s'agit d'un cas unique, qui rend difficile l'extrapolation de cet intrigant résultat à l'ensemble des décès. ■ **H. J.**

+7 %

L'augmentation de la mortalité infantile en France

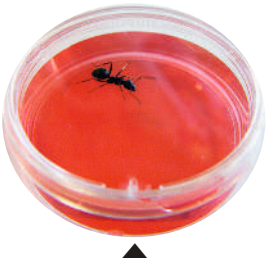
ÉPIDÉMIOLOGIE Entre 2012 et 2019, le taux de mortalité des enfants de moins de 1 an a augmenté pour la première fois en France, passant de 3,32 à 3,56 décès pour 1000 naissances par an. Près de 25 % surviennent le premier jour et 50 % la première semaine. Des chiffres *« très inquiétants »* selon les auteurs de l'étude, qui jugent *« primordial »* de comprendre les causes de cette augmentation. **H. J.**

SOURCE : MARTIN CHALUMEAU, UNIVERSITÉ PARIS CITÉ, FRANCE.

Des fourmis pour renifler le cancer

ONCOLOGIE Une équipe française montre qu'une espèce de fourmi, *Formica fusca*, est capable d'identifier des cellules cancéreuses à l'odeur, après quelques minutes d'apprentissage. L'analyse des composés émis par les différentes cellules montre que chaque lignée cellulaire a bien sa propre odeur qui peut être utilisée par les fourmis pour les détecter. Reste à tester leur efficacité en phase clinique sur de vrais malades. **H. J.**

SOURCE : BAPTISTE PIQUERET, UNIVERSITÉ SORBONNE PARIS NORD, FRANCE.



PAUL DEVIENNE, LABORATOIRE D'ETHOLOGIE EXPÉRIMENTALE ET COMPARÉE DE L'UNIVERSITÉ SORBONNE PARIS NORD

« Formica fusca » différencie des cellules humaines saines de cellules cancéreuses (ici dans une boîte de Petri).

Télomères et longévité

En 2009, trois chercheurs américains se sont vu décerner le Prix Nobel de Médecine pour leurs travaux exceptionnels en biologie et génétique, qui ont permis la compréhension des mécanismes de protection de l'ADN au cœur des cellules.

Genèse d'une découverte

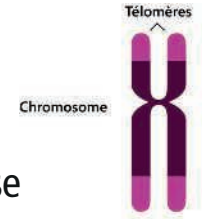
Le mot télomère vient du grec telos (fin) et meros (partie).

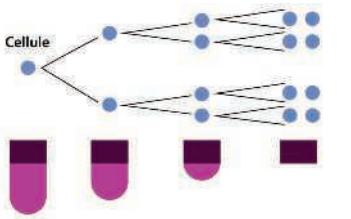
Dans les années 80, Elizabeth Blackburn est professeur de biologie à l'Université de Californie. Elle collabore avec Carol Greider, professeur de biologie moléculaire et Jack Szostak, professeur de génétique, afin d'étudier les mécanismes de protection et de réparation des chromosomes lors de la mitose cellulaire. Leurs travaux cherchent à expliquer comment les divisions cellulaires successives peuvent s'enchaîner sans que les chromosomes ne fusionnent entre eux ou ne s'abiment.

Mitose cellulaire et réplication des chromosomes

Les cellules de l'organisme se reproduisent régulièrement par un processus de division appelé mitose, la cellule initiale se scindant en deux cellules filles identiques qui contiennent le même matériel génétique. Il se produit pas moins de deux trillions de mitoses dans le corps humain chaque jour, ce qui permet de remplacer les cellules mortes ou abimées. Ce grand nombre fait supposer la survenue d'erreurs, c'est pourquoi les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un système de protection des chromosomes.

Deux découvertes en une : télomères et télomérase





Les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire

Situés aux extrémités de chaque chromosome, les télomères jouent un rôle de protection au moment de la séparation du matériel génétique. En effet à chaque division, ils raccourcissent légèrement, « sacrifiant » leur intégrité pour protéger celle des chromosomes. Le raccourcissement progressif des télomères finit par provoquer la mort de la cellule, appelée sénescence. Les trois scientifiques ont également identifié une enzyme, baptisée télomérase, capable de rallonger les télomères et donc de prolonger la vie des cellules. Ils ont remarqué que cette enzyme n'était active que dans les cellules souches et germinales. Plus le nombre de de cellules sénescentes est grand, plus le vieillissement de l'organisme accélère : la longévité est donc directement liée à la longueur des télomères.

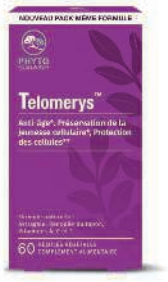
Astragale et télomères,

Des scientifiques se sont intéressés à la racine de l'Astragalus membranaceus, une petite fleur très utilisée en médecine traditionnelle comme tonifiant et immunostimulant. Ils ont mis en évidence que ses propriétés étaient dues à deux composés, appelés cycloastragenol et astragaloside IV, qui avaient la capacité de réactiver la télomérase dans les cellules. Après plusieurs années de développement, le laboratoire français PhytoResearch a mis au point une formule naturelle basée sur les résultats de ces avancées scientifiques. Telomerys associe un extrait concentré de racine d'Astragalus membranaceus à du resvératrol, un puissant antioxydant, ainsi que des vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffisent pour constater une diminution significative des rides, une amélioration des fonctions cognitives (mémoire, concentration) et un regain d'énergie.

Des conseils ?

Les experts du Laboratoire PhytoResearch sont à votre écoute au **01 85 42 38 74** et sur www.telomerys.com

Telomerys™ : Préservation de la jeunesse cellulaire

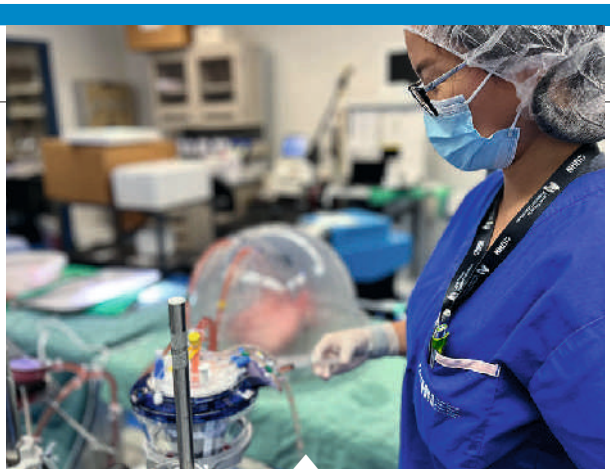


Disponible en pharmacie

Telomerys 60 gélules végétales est disponible grâce au code ACL 602 42 56

Des poumons universels pour la transplantation

Des chercheurs sont parvenus à modifier le groupe sanguin des organes prélevés.



UHN

Les poumons de groupe sanguin A ont été convertis en groupe O.

Des poumons prélevés sur des personnes de groupe sanguin A ont pu être convertis en groupe O, ce qui les rend potentiellement compatibles avec n'importe quel receveur en attente d'une greffe. Ces « poumons universels » réalisés à l'institut de recherche de l'hôpital général de Toronto (Canada) permettraient de lever le principal obstacle à la transplantation d'organes : l'incompatibilité de groupe sanguin entre le donneur et le receveur. Les chercheurs ont pour cela utilisé une machine de perfusion *ex vivo* des poumons pour délivrer aux organes un cocktail d'enzymes supprimant les marqueurs (antigènes) de groupe A. En quatre heures, 97 % de ces marqueurs étaient supprimés dans les huit poumons perfusés. Trois d'entre eux ont par la suite été exposés à du plasma sanguin contenant des anticorps anti-A, pour tester un possible rejet. Les réactions inflammatoires ont été minimes alors qu'elles sont habituellement délétères. Prochaine étape : transposer cette méthode avec une greffe sur l'animal, en l'occurrence la souris. ■ **C. G.**

EN DEUX MOTS

XÉNOGREFFE David Bennett, premier humain à avoir bénéficié d'une greffe d'un cœur de cochon, est décédé 61 jours après son opération. **PRÉVENTION** Un plan national antichute prévoit d'informer et de sensibiliser le public aux risques de chutes qui sont aujourd'hui associées à 10 000 morts par an en France. **COVID-19** Des chercheurs canadiens ont montré que le Sras-CoV-2 peut non seulement infecter les cervidés mais aussi y évoluer et être transmis à l'humain.

Une bactérie à cotte de mailles

MICROBIOLOGIE C'est peut-être à cause de son revêtement que *Clostridioides difficile*, cauchemar des infections nosocomiales à l'hôpital, est si dure à éradiquer. Des chercheurs britanniques ont en effet découvert que cette bactérie était recouverte d'un maillage de protéines pratiquement impénétrable. Une véritable cotte de mailles qui empêche antibiotiques et molécules du système immunitaire de pénétrer. **H. R.**

SOURCE : PAOLA LANZONI-MANGUTCHI, UNIVERSITÉ DE NEWCASTLE, ROYAUME-UNI.

ELENABS / ALAMY

Cinq maladies chroniques vont pouvoir bénéficier du dispositif.

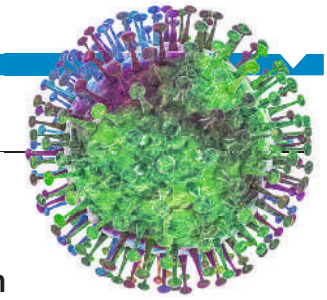
Remboursement de la télésurveillance

TÉLÉMÉDECINE Testée depuis 2014, la télésurveillance médicale commencera à être remboursée d'ici au 1er juillet, à l'instar de la téléconsultation et la télé-expertise. Cinq maladies chroniques ont été listées par la Haute Autorité de santé : le diabète, les insuffisances rénale, respiratoire et cardiaque chroniques et, à terme, le suivi des prothèses cardiaques implantables. **S. R.-M.**

Des neurones spécifiques du calcul

NEUROSCIENCES Des chercheurs ont identifié des neurones qui se déclenchent lors de certaines opérations mathématiques. Parmi ces cellules situées dans le lobe temporal médian du cerveau, certaines se montrent actives exclusivement pendant les soustractions, alors que d'autres ne s'activent que lors des additions. Que les calculs soient écrits en chiffres ou en lettres, cette activité est la même. **N. M.**

SOURCE : ESTHER KUTTER, UNIVERSITÉ DE BONN, ALLEMAGNE.



K. KON/SCIENCE PHOTO LIBRARY/SUCRE SALÉ

Le VIH a été éliminé grâce à une greffe de cellules souches.

Une troisième guérison du sida

INFECTIOLOGIE Une Américaine a guéri du sida grâce à une greffe de cellules souches porteuses d'une mutation protégeant du virus (CCR5 delta 32). Après Timothy Brown en 2008 et Adam Castillejo en 2019, c'est la troisième personne à bénéficier incidemment de cette greffe destinée à traiter un cancer très agressif. Les lourds effets secondaires ne permettent cependant pas encore d'envisager la stratégie comme un remède à l'infection. **H. R.**

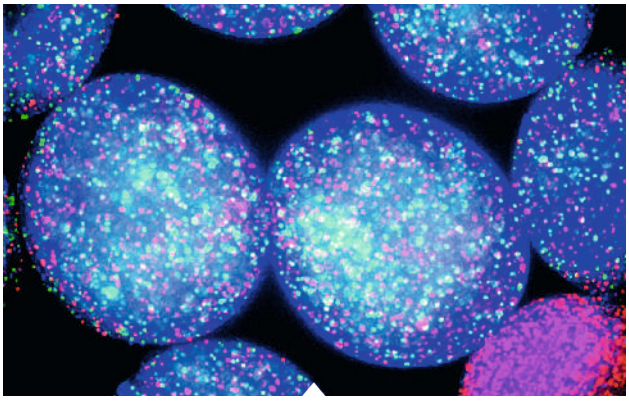
SOURCE : JINGMEI HSU, WEILL CORNELL MEDICINE, ÉTATS-UNIS

18,2 millions

Le nombre estimé de décès dus au Covid-19

ÉPIDÉMIOLOGIE Officiellement, selon l'OMS, 6,1 millions de morts du Covid-19 ont été recensés dans le monde depuis fin 2019. Mais une vaste analyse de l'excès de mortalité attendue estime que ce nombre serait en réalité près de trois fois supérieur sur la période du 1er janvier 2020 au 31 décembre 2021. Les 18,2 millions de décès englobent ainsi l'ensemble de la surmortalité, et pas uniquement les décès provoqués directement par l'infection. **H. J.**

SOURCE : HAIDONG WANG, UNIVERSITÉ DE WASHINGTON, ÉTATS-UNIS



ANDREA WEISS, ZACH HOLMES AND YUANCHI HA, DUKE UNIVERSITY

La structure de l'éponge facilite la prolifération de différentes populations de bactéries (ici colorées suivant leur espèce).

Les bactéries affectionnent les éponges de cuisine

MICROBIOLOGIE Les éponges synthétiques dans nos cuisines sont des incubateurs à bactéries plus efficaces encore qu'une boîte de Petri dans un laboratoire ! C'est ce que montrent des chercheurs qui mettent en avant la structure faite de pores de tailles différentes, favorisant une importante diversité bactérienne : celles proliférant mieux lorsqu'elles sont isolées ou d'autres espèces préférant se mélanger. **A.-S. T.**

SOURCE : F. WU, UNIVERSITÉ DUKE, ÉTATS-UNIS.

www.lesproduitsdumois.com

GÉREZ LE STRESS ET BOOSTEZ VOTRE ÉNERGIE !

Retrouvez énergie et sérénité grâce à **D-Stress® Booster** ! Formule unique et brevetée agissant durablement sur le stress au quotidien. Un sachet de **D-Stress® Booster** contient 200 mg de magnésium et des vitamines B qui contribuent au métabolisme énergétique et à la diminution du stress.
D-Stress® Booster votre allié contre le stress ! Agit en 30 min, sans accoutumance. Prendre 1 sachet par jour, le matin.
● Laboratoire Synergia. En pharmacie, env. 17€, boîte 20 sachets, ACL 5136879 ou sur www.synergiashop.com ou par tél. au 04 77 42 30 10.

STOP AU CHOLESTÉROL

Et si vous pouviez enfin faire baisser votre taux de mauvais cholestérol ?

ControlStérol aide à **réguler naturellement les taux de « bon » et « mauvais » cholestérol** (HDL et LDL) grâce à une combinaison **unique** d'extraits concentrés d'Ail noir et de Cannelle de Ceylan, associés à une souche brevetée de ferments lactiques, des vitamines et des nutriments essentiels.

Une gélule « jour » et une gélule « nuit » aident à **diminuer le « mauvais » cholestérol** LDL (qui favorise la formation de plaques lorsqu'il est en excès), limitant le risque cardiovasculaire associé, tout en **augmentant le « bon » cholestérol** HDL. **Une solution naturelle, simple, efficace !**

● ControlStérol boîte 60 gélules végétales (30 gélules « jour » & 30 gélules « nuit ») ACL 6260490. En pharmacie et sur www.controlsterol.com - Plus d'infos au 01 83 96 83 01 (tarif local)

BIEN DORMIR AVEC D-STRESS® SOMMEIL

D-Stress® Sommeil est l'association de la formule D-Stress®, riche en magnésium, et de l'Eschscholtzia californica. Il est reconnu pour ses propriétés sédatives qui vous aideront à retrouver naturellement un **sommeil réparateur**.
D-Stress® Sommeil contribue ainsi à une amélioration de l'**endormissement** et à une réduction des **réveils nocturnes**.
Sans effets secondaires, ni accoutumance.
● Laboratoire Synergia.
En pharmacie, env. 14 € boîte de 40 comprimés.
Commandez en ligne sur www.synergiashop.com ou par tél. au 04 77 42 30 10.

POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE
Pour paraître dans cette rubrique, R'Médias 01 46 48 85 41 - photos D.R.

Le fer du poignard de Toutankhamon descend des étoiles

Des chercheurs ont déterminé qu'il provient d'une octaédrite, une météorite principalement constituée d'alliages de fer et de nickel.

D'or, de cristal de roche, de fer… et de particules célestes ! Une analyse chimique du poignard à lame de fer du célèbre pharaon Toutankhamon (vers 1347-1327 avant J.-C.) a permis de percer le mystère de son origine extraterrestre. Des examens menés au Musée égyptien du Caire, en février 2020, sur la dague retrouvée dans le trésor de l'enfant-roi, ont conduit à l'identification précise du type de météorite dans lequel il avait été façonné.

Une lame sans doute importée du Levant

En utilisant des méthodes non invasives d'imagerie par spectrométrie de fluorescence des rayons X, des chercheurs japonais de l'Institut de technologie de Chiba et leurs collègues égyptiens sont parvenus à identifier, à la surface de la lame, des structures dites de Widmanstätten. Il s'agit de figures en lamelles indiquant que le fer utilisé provenait d'une octaédrite, une météorite principalement constituée d'alliages de fer et de nickel, dont les chercheurs ont pu obtenir l'image métallographique. La distribution de nickel et de chlore sur les deux faces de la lame, de même que la présence de taches noires, vestiges d'inclusion de troïlite, ont ainsi aidé à en préciser la nature. « *Ces corrosions ont également permis de caractériser les températures de chauffe utilisées. Elles ont révélé que cette lame avait été forgée à basse température, c'est-à-dire à moins de 950 °C,* explique Philippe Walter, directeur du Laboratoire d'archéologie moléculaire et structurale (Lams) à Paris. *De quoi comprendre, en ces débuts de la métallurgie du fer, de quelle façon les forgerons de l'époque avaient produit cette lame avec ce fer tombé du ciel.* » Une lame sans doute importée du Levant, offerte à Amenhotep III puis transmise à son petit-fils. ■ **B. A.**

MUSEE EGYPTIEN DU CAIRE / ARALDO DE LUCA

L'analyse des taches noires sur la lame du poignard a permis de déterminer la nature de celle-ci et la température à laquelle elle a été forgée.

ESTEBAN FELIX/AP PHOTO

Le monolithe était conservé dans un musée chilien depuis 1878.

Le premier moaï restitué à l'île de Pâques

ARCHÉOLOGIE Exposé au Musée national d'histoire naturelle de Santiago (Chili) depuis 1878, le moaï Tau a retrouvé son île d'origine, Rapa Nui. C'est la toute première restitution de l'une de ces statues géantes sculptées entre les XIIIe et XVe siècles et pillées par plusieurs pays au cours de l'histoire. Le monolithe de basalte de 715 kg pour 1,5 mètre de haut rejoindra le musée anthropologique Padre Sebastián Englert, sur l'île de Pâques. **M. B.**

IL A DIT

« Le patrimoine afghan doit absolument continuer à être protégé ! »

Philippe Marquis, directeur de la Délégation archéologique française en Afghanistan (Dafa) s'inquiète de la multiplication des pillages depuis le retour des talibans, notamment dans la province de Bamiyan où les célèbres Bouddhas géants avaient été détruits en 2001.

LES ACTEURS, LES ÉVÉNEMENTS, LES AFFRONTEMENTS

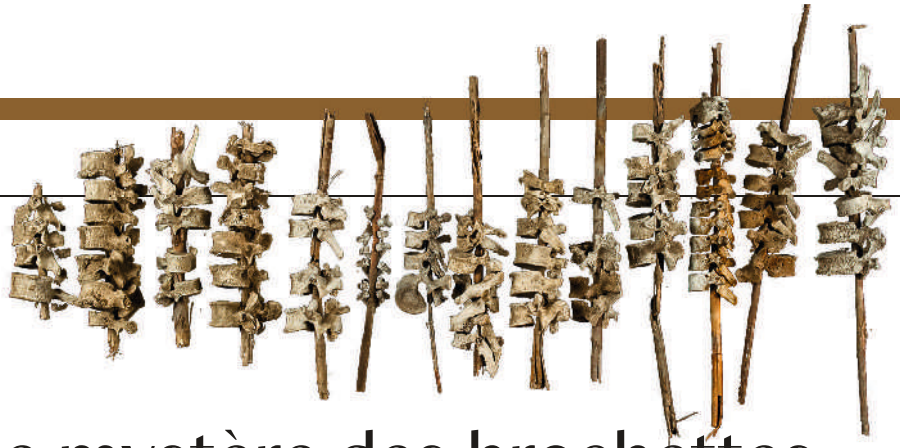
JOUR APRÈS JOUR, COMME ILS N'AVAIENT JAMAIS ÉTÉ MONTRÉS

LE LIVRE-ÉVÉNEMENT
60 ANS APRÈS
LES ACCORDS DE PAIX

500 PAGES
2000 PHOTOS

Historia

Les éditions du cerf



Ces étranges assemblages d'os ont été retrouvés dans des tombes.

C. O'SHEA

Le mystère des brochettes de vertèbres humaines élucidé

Au Pérou, elles symbolisaient la résistance des populations face aux conquistadors espagnols.

C'est à un bien curieux spectacle que des archéologues ont été confrontés dans la vallée de Chincha au Pérou. À 200 km au sud de Lima, ils se sont en effet retrouvés face à des sépultures où des vertèbres humaines avaient été enfilées sur des roseaux comme l'auraient été les perles sur le fil d'un collier ! La datation de ces os, ainsi que celles des roseaux, dans une région soumise à des pillages de tombes par les conquistadors assoiffés d'or au XVIe siècle, a conduit les scientifiques à considérer que ces populations andines auraient réenseveli leurs morts, en « reconstituant » l'épine dorsale des dépouilles par rétablissement des vertèbres (cervicales, thoraciques et lombaires) sur des tiges de roseaux. Une sorte d'acte de résistance ritualisé face aux destructions des Espagnols. D'autres hypothèses ont aussi été formulées, qu'il s'agisse de « hochets » utilisés lors de rituels, ou encore de trophées de guerre pris sur des corps ennemis. **B. A.**

FALKLANDS MARITIME HERITAGE TRUST / NATIONAL GEOGRAPHIC

À VOIR SUR LE NET

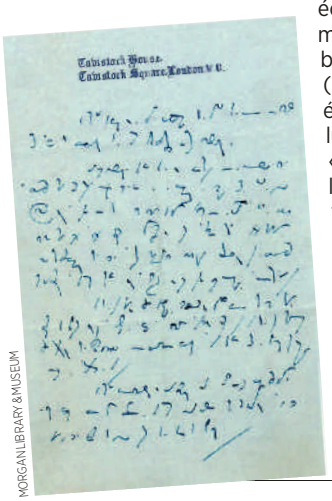
L' « Endurance » retrouvée 107 ans après son naufrage

ARCHÉOLOGIE Le célèbre navire de l'explorateur britannique Ernest Shackleton, brisé par les glaces en 1915 au large de l'Antarctique, a été retrouvé à 3008 mètres de profondeur dans la mer de Weddell. Dans un état de conservation exceptionnel, l'épave a pu être filmée sous toutes les coutures par le drone sous-marin de l'expédition Endurance22, à l'origine de cette découverte. **M. B.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

« L'écriture du diable » de Dickens décodée

CRYPTOGRAPHIE Un jeune étudiant américain a réussi à déchiffrer le « code Dickens », une étrange écriture sténographique mise au point par l'écrivain britannique Charles Dickens (1812-1870). Sa complexité était telle que le romancier lui-même l'avait surnommée « l'écriture du diable ». La lettre décodée n'apporte toutefois pas d'enseignement crucial : il y fait appel au rédacteur en chef du *Times* d'alors pour un contentieux d'affaires. **M. B.**



MORGAN LIBRARY & MUSEUM

La lettre sténographiée date de 1859.

106 millions d'années

L'âge d'un virus intégré au génome humain

PALÉONTOLOGIE Un virus à ADN « fossilisé » a été identifié dans le génome humain. Il aurait intégré le code génétique de nos ancêtres à l'époque des dinosaures. Baptisé Mavericks, c'est l'un des plus vieux virus fossiles connus. Selon les estimations, 8 % à 10 % de notre génome serait constitué d'anciennes séquences de virus intégrées à notre ADN. **R. M.**

SOURCE : JOSÉ GABRIEL NIÑO BARREAT, UNIVERSITÉ D'OXFORD, ROYAUME-UNI.

Un exceptionnel tambour de craie

ARCHÉOLOGIE Cette sculpture de 5000 ans, mise au jour dans une tombe d'enfant dans le Yorkshire (Royaume-Uni), représente la découverte préhistorique la plus importante depuis un siècle dans le pays, selon le British Museum qui a annoncé la découverte. Ce tambour de craie, qui malgré son appellation n'avait pas de vocation musicale, date de l'époque de Stonehenge et constitue l'un des objets décorés de la manière la plus élaborée de cette période. **M. B.**

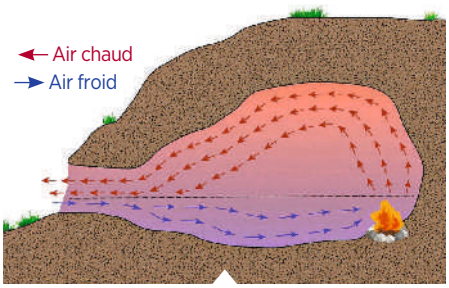
L'objet préhistorique n'avait aucune fonction musicale.

BRITISH MUSEUM / AFP

Où placer le feu dans une grotte

PALÉOANTHROPOLOGIE Il y a 175 000 ans, les hominidés qui peuplaient la grotte de Lazaret, aujourd'hui située à Nice, savaient où y placer leur feu pour en profiter, tout en limitant la stagnation des fumées toxiques à l'intérieur. C'est ce que montre une simulation informatique permettant de modéliser la dispersion de la fumée en fonction de l'emplacement du foyer. **C. B.**

SOURCE : Y. KEDAR, UNIV. DE TEL-AVIV, ISRAËL.



YAFIT KEDAR ET AL.

C'est au point le plus profond de la grotte que la fumée se disperse le mieux.

IL A DIT

« Je ne fais pas de la désextinction, mais je pense que c'est une idée intéressante, et techniquement, c'est très enthousiasmant »

Tom Gilbert, paléogénéticien à l'université de Copenhague (Danemark), à propos de son étude montrant qu'à défaut de mammouth, il serait techniquement possible de ressusciter par édition génétique une espèce de rat *(Rattus macleari)* disparue il y a 120 ans *(lire aussi p. 88).*

La vénus de Willendorf vient d'Italie

LOIS LAMMERHUBER - PHOTOAGENTUR LAMMERHUBER / LA COLLECTION

ARCHÉOLOGIE Vieille de 30 000 ans, une des plus célèbres figurines de la préhistoire, la vénus de Willendorf, découverte en 1908 sur les rives du Danube, en Autriche, vient de livrer un nouveau secret. Des analyses densitométriques (scanner) destinées à accéder à sa structure interne ont révélé que la statuette du paléolithique avait été sculptée dans des concrétions de calcaire oolithiques de Loppio, au nord de l'Italie. **B. A.**

La célèbre statuette est composée de calcaire oolithique.

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

F. LEDOUX/NATURAGENCY

OCÉANOGRAPHIE

Des satellites pour voir sous la banquise

Une équipe d'océanographes français a présenté une nouvelle méthode d'analyse des courants marins grâce aux données de satellites altimétriques. Une meilleure description de ces courants sous la banquise de l'Antarctique enrichirait les modèles sur le réchauffement climatique. À lire sur le site de *La Recherche*.
https://bit.ly/902banquise

BIOLOGIE

« La science est l'activité la plus révolutionnaire de l'humanité »

À la tête du prestigieux Institut Francis-Crick à Londres (Royaume-uni), le biologiste Paul Nurse, prix Nobel 2001, nous a accordé un grand entretien où il livre sa vision d'une science libre.
sciav.fr/902nurse

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

2 minutes

Un crocodile croqueur de dinosaure

J. CSOTONYI/WHITE ET AL.

Découvrez la modélisation d'un fossile de crocodile vieux de 95 millions d'années, découvert en Australie, dévoilant son dernier repas : un petit dinosaure !
sciav.fr/902croco

5 minutes

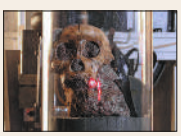
L'émergence de la conscience chez les bébés

AFP

Une étude inédite montre que chez les nourrissons, la perception consciente de l'environnement est six fois plus lente que chez les adultes.
sciav.fr/902bebe

10 minutes

Dans les secrets de mystérieux hominidés



ERSF

À Grenoble, le synchrotron européen, le plus puissant du monde, tente de percer les mystères de deux hominidés : *Australopithecus ediba* et *Homo naledi*.
sciav.fr/902sync

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

Quantique

La révolution du XXIe siècle

Laboratoires de recherche et géants du numérique se sont lancés dans la course au développement de l'ordinateur quantique qui promet une puissance de calcul décuplée. Les applications futures sont nombreuses, en chimie, en physique des matériaux, en intelligence artificielle ou en cryptographie.

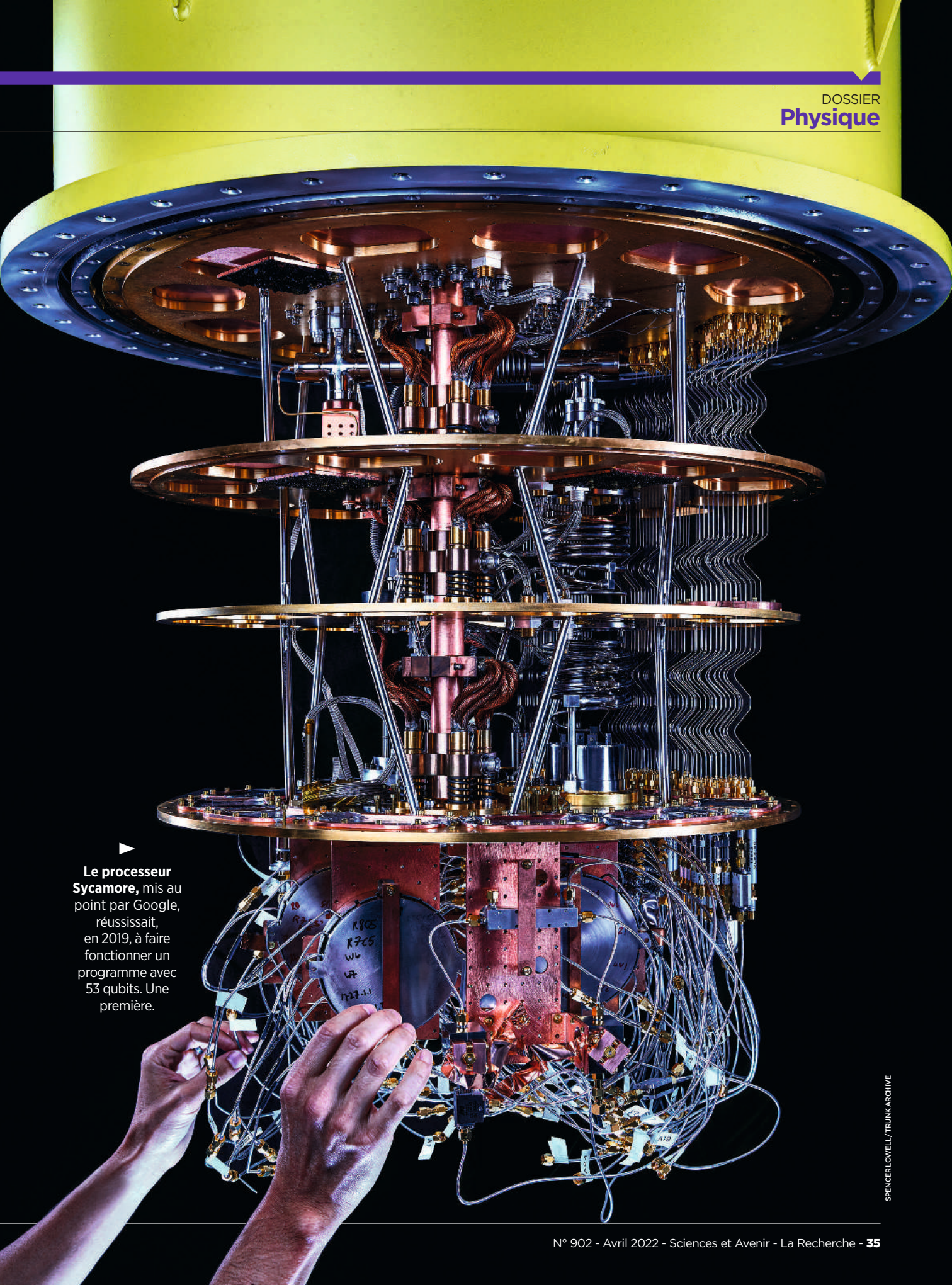
Dossier réalisé par
Fabrice Nicot et
Corentin Paillassard

DÉVELOPPEMENT
À la recherche du qubit idéal
p. 36

INTERVIEW
« Nous anticipons déjà l'arrivée de l'ordinateur quantique »
p. 40

APPLICATIONS
Du quantique à tout faire
p. 42

SÉCURITÉ
Un défi pour la cryptographie
p. 46



Le processeur Sycamore, mis au point par Google, réussissait, en 2019, à faire fonctionner un programme avec 53 qubits. Une première.

SPENCER LOWELL/TRUNK ARCHIVE

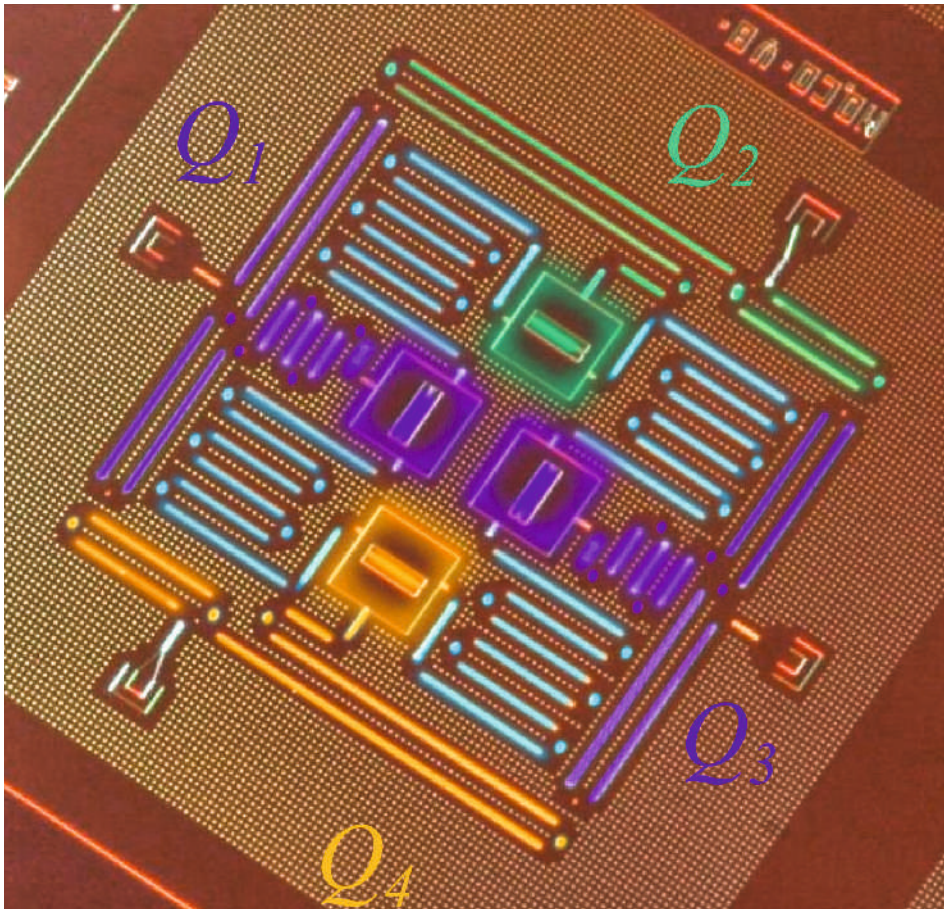
L'ordinateur ultime

Fin 2021, la revue en ligne *Nature Reviews Physics* présentait 2022 comme l'année des 40 ans de l'informatique quantique. 40 ans ! Mais où sont les ordinateurs quantiques ? Ils prennent enfin forme dans les laboratoires. Leur concept est bien né à l'orée des années 1980, lors d'un colloque organisé en mai 1981 par le MIT et IBM, qui réunissait les plus grands noms de la physique fondamentale et de l'informatique. À quel moment a germé l'idée géniale ? Impossible à dire mais en 1982, l'*International Journal of Theoretical Physics* publiait les actes du colloque et le concept était bien là, dans un article de synthèse signé Richard Feynman (prix Nobel de physique 1965) : l'ordinateur ultime pour simuler le comportement de la matière devra être quantique, comme la matière, expliquait-il en substance. Un tel projet semblait de la science-fiction. Aujourd'hui, « l'ordinateur ultime » promet déjà des applications en biologie, en chimie, en physique des matériaux, en économie, en intelligence artificielle… Plus qu'un concept, c'est bien une révolution qui a germé ce printemps-là et que nous voyons désormais à l'œuvre. ■ F. N.

À la recherche du qubit idéal

Plusieurs pistes sont explorées dans les laboratoires publics comme privés de la planète afin de mettre au point cette pièce maîtresse de l'ordinateur quantique. Une mobilisation générale à la hauteur du défi scientifique et technique à relever.

Nul ne connaît encore précisément sa forme ni sa nature, mais le qubit, ou bit quantique, sera forcément au cœur de l'ordinateur quantique. Et pour cause : il s'agit d'une transposition dans le domaine quantique du bit classique, sur lequel reposent nos machines actuelles. Un bit constitue une unité élémentaire d'information. Il peut prendre la valeur « 0 » ou « 1 », ce qui explique que toute l'informatique est codée en langage binaire. Son homologue quantique se distingue par sa capacité à prendre la valeur « 0 », « 1 » ou « 0 » et « 1 » en même temps. Et cela change tout ! « *Un ordinateur classique traite les tâches une par une, de manière séquentielle. L'ordinateur quantique les mène en parallèle grâce à cette capacité à se trouver dans deux états en même temps,* résume Tristan Meunier, physicien au sein de l'équipe Quanteca de l'institut Néel (CNRS), à Grenoble. *Ce parallélisme est la clé des performances attendues de l'ordinateur quantique. Il est aussi au cœur de l'extrême difficulté à mettre au point des qubits en état de fonctionner.* » En effet, il s'agit ni plus ni moins que d'effectuer des manipulations au plus intime de la matière, là où s'exercent les lois étranges de la physique quantique. L'effort pour y parvenir est mondial, mêlant laboratoires publics et privés, et n'a finalement rien à envier à celui effectué après-guerre pour mettre au point les ordinateurs à base de transistors. Début 2021, le président Emmanuel Macron annonçait ainsi la mise en



IBM RESEARCH

Sur ce circuit quantique réalisé par IBM, 4 qubits ont été colorés artificiellement pour les faire ressortir. Chacun est constitué d'un circuit supraconducteur simulant le comportement d'un atome.

1982

Le concept d'ordinateur quantique est proposé par le physicien américain Richard Feynman.

1,8

milliard d'euros

Le montant du plan quantique annoncé par le président de la République en janvier 2021.

place d'un plan quantique national doté de 1,8 milliard d'euros. Aux États-Unis, il est question de 100 milliards de dollars, même si cette somme ne sera pas consacrée uniquement aux technologies quantiques.

Pour comprendre les enjeux scientifiques et techniques autour de la mise au point des qubits, il faut effectuer une première incursion dans la mécanique quantique, à la découverte du concept de superposition. Il s'agit d'une caractéristique réservée aux particules élémentaires (photons, électrons…) et aux atomes. Prenons un électron enfermé dans une boîte. Sa nature quantique fait qu'il n'est pas présent en un endroit précis, mais qu'il se répartit dans toute la boîte, sous la forme d'une probabilité de présence. Pour le localiser, il faut ouvrir la boîte et faire une mesure de sa position. À la manière d'une brume qui se condenserait en une goutte d'eau, l'électron se fixe alors en un endroit précis. Toutes les caractéristiques des particules, et pas seulement leur position, se manifestent sous la forme d'une probabilité : leur vitesse, leur spin *(voir les définitions p. 39)*, etc. Voilà pourquoi un qubit peut être dans deux états à la fois. Rigoureusement parlant, il est dans une combinaison des états « 0 » et « 1 ». Par exemple : 30 % « 0 » et 70 % « 1 » ; ou 50/50 ; ou 100 % « 0 » et 0 % « 1 ». Toutes les combinaisons sont possibles.

Mais qu'entend-on par « état 0 » ou « état 1 » ? Cette question fondamentale revient à se demander comment coder l'information. Dans le cas du bit classique, le codage se fait par le pas-

CEA

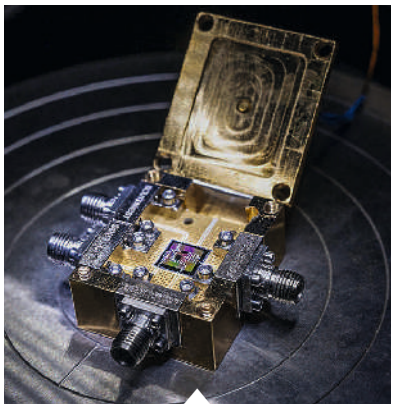
« Un ordinateur classique traite toutes les tâches une par une, l'ordinateur quantique les mène en parallèle »

Tristan Meunier, physicien dans l'équipe Quanteca, institut Néel (CNRS), Grenoble

sage ou non d'un courant électrique : « 1 », le courant passe dans le bit ; « 0 », il ne passe pas. Dans le cas quantique, d'autres solutions sont possibles puisque les particules « qubits » ont plusieurs caractéristiques, par exemple leur spin ou leur niveau d'énergie. Cette diversité offre donc toute une palette de solutions pour fabriquer un qubit, contrairement au transistor des ordinateurs classiques. D'où la floraison actuelle des différentes technologies *(voir le tableau ci-dessous)*.

L'efficacité augmente de façon exponentielle

Avant de rentrer dans le détail des familles de qubits, il faut encore décrire une autre propriété étrange dont la physique quantique a le secret : l'intrication. Deux particules intriquées sont liées de telle sorte que toute action sur l'une, par exemple un changement de spin, entraîne immédiatement une action sur l'autre. Et cela, quelle que soit la distance qui les sépare. Cette propriété lie ainsi les objets quantiques entre eux, sans l'intermédiaire d'un « fil », presque par magie pourrait-on dire. D'ailleurs, Albert Einstein lui-même qualifiait l'intrication d'*« étrange action à distance »*… Grâce à elle, l'efficacité des qubits va augmenter de manière exponentielle. Prenons deux qubits. Nous avons vu que chacun peut se trouver dans une combinaison de « 0 » et de « 1 ». Si en plus ils sont intriqués, ils forment un seul système, indissociable, pouvant prendre quatre valeurs simultanément (« 0-0 », « 1-1 », « 0-1 », « 1-0 »). Quatre valeurs à la fois, contre une seule pour un bit classique : la supériorité de l'ordinateur quantique se dessine donc nettement. D'autant que le nombre d'états pris simultanément augmente vertigineusement avec le nombre de qubits intriqués. Trois qubits peuvent se trouver dans huit états à la fois ; quatre qubits, 16 états ; Et enfin n qubits donnent 2^n états ! Tout l'enjeu de l'ordinateur quantique consiste donc à trouver de bons candidats pour faire des qubits et à les intriquer. Dans l'idéal, il faudrait utiliser des atomes ou des particules élémentaires, puisqu'ils possèdent naturellement les propriétés quantiques de superposition et d'intrication. Mais on ne manipule pas facilement des objets aussi infimes. Car la moindre interaction avec leur environnement — vibrations mécaniques, chaleur, champ magnétique — leur fait perdre ces propriétés. C'est la décohérence, qui correspond, dans l'exemple de l'électron dans sa boîte, à la transformation de sa probabilité de présence diffuse en sa condensation en un endroit précis. *« La décohérence est le principal problème,* résume Tristan Meunier. *Il faut à tout prix éviter qu'elle se produise lorsque les qubits calculent. Sans cela, des erreurs se produisent et les performances baissent.* »
Il faut donc non seulement mettre au point des qubits, les intriquer, mais aussi les isoler de leur environnement.



HUBERT RAGUET / ALICE&BOB / LPENS / CNRS PHOTOTHÈQUE

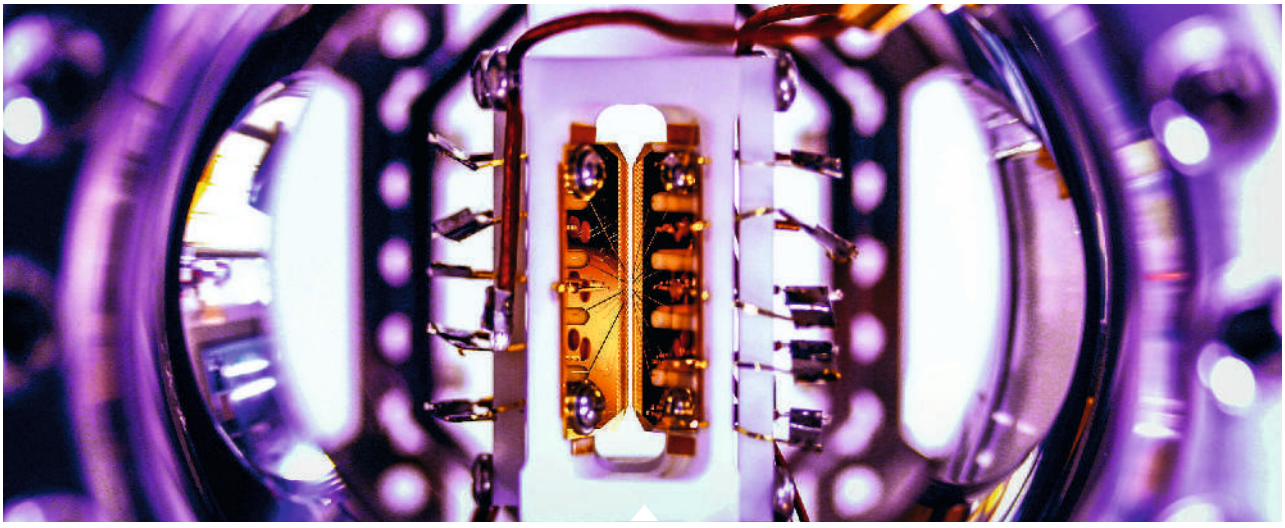
La conception de qubits à partir de circuits supraconducteurs, développée par la start-up française Alice & Bob, réduirait les erreurs de calcul.

Cinq techniques pour fabriquer des qubits

	Supraconducteur	Ion piégé	Photon	Atome	Silicium
Taille du qubit (en millimètres)	0,1	1	0,1	0,001	0,0001
Rapidité de calcul (en secondes)	100×10^{-9}	100×10^{-6}	1×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-6}
Température d'opération (en kelvins)	50×10^{-3}	300	4	300	1
Nombre record de qubits intriqués	62	32	100 (expérimental)	256 (simulation)	4

BRUNO BOURGEOIS - SOURCE TRISTAN MEUNIER, INSTITUT NÉEL, GRENOBLE.

Les grands industriels, tels IBM, Intel ou Google, se focalisent sur les qubits supraconducteurs et de silicum, plus simples à mettre en œuvre, tandis que ceux à ions piégés, photons et atomes sont pour l'instant développés dans les laboratoires et les start-up.



S. DEBNATH AND E. EDWARDS/JQI

Si la technologie des ions piégés est la plus ancienne pour faire des qubits, sa production à l'échelle industrielle reste à inventer (ici, un qubit de ce type réalisé par l'entreprise américaine IonQ).

Vaste programme ! Plusieurs voies se dessinent pour y parvenir. L'une des plus prometteuses consiste à simuler un atome à l'aide d'un circuit électrique de la taille du micromètre, placé à très basse température (-273 °C) de telle sorte qu'il devienne supraconducteur. L'information « 0 » ou « 1 » est codée par le sens du passage du courant dans le circuit. Google, IBM et Intel notamment sont particulièrement en pointe sur le sujet. En novembre 2021, IBM a même annoncé la mise au point d'un processeur de 127 qubits. Un exploit technologique aux performances encore floues car l'intrication entre les qubits n'est pas assez bonne pour que l'on puisse pleinement évaluer sa puissance. Mais les choses avancent très vite, comme le souligne Pierre Jaeger, directeur technique d'IBM Quantum France. *« En 2021, nous avons prouvé une intrication de processeur entier sur les processeurs Falcon (27 qubits) et Hummingbird (65 qubits) d'IBM* [le record « officiel reste de 62 qubits, voir le tableau ci-contre]. *Ces résultats démontrent l'un des plus grands états intriqués jamais créés.* » IBM dame ainsi le pion au processeur Sycamore de Google, qui affichait 53 qubits intriqués en 2019…

Autre technologie prometteuse, le qubit de silicium. Cette fois, un électron est piégé sur un substrat de silicium. Les états « 0 » et « 1 » sont représentés par le spin de l'électron qui peut être « up » ou « down ». Le spin lui-même est manipulé avec un champ magnétique. De petite taille (quelques dizaines de nanomètres), les qubits de silicium pourraient ainsi être intégrés par millions voire milliards sur une même puce, grâce aux technologies CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor), utilisées dans l'industrie microélectronique. Cette approche est développée notamment par Intel et le CEA en association avec le CNRS. IBM commencerait aussi à s'y intéresser.

Anticiper et corriger les erreurs de calcul

Enfin, la technique des ions piégés fait désormais quasiment figure d'ancêtre dans ce secteur en pleine accélération. Il s'agit de la première technologie développée pour faire des qubits, au début des années 1990. Elle consiste à prendre un atome, puis lui retirer un ou plusieurs électrons pour en faire un ion que l'on va ensuite piéger sous vide à l'aide de lasers. L'information est encodée par l'excitation de cet ion, toujours par laser. Pour Tristan Meunier, *« la principale qualité de ces qubits est d'être très bien isolés de leur environnement, ce qui permet un temps de cohérence plus long qu'avec les autres systèmes. En revanche, contrairement au silicium et au supraconducteur, la technologie pour les fabriquer à grande échelle reste à inventer.* » Voilà pour les principales pistes explorées, même si la liste n'est pas exhaustive. Les photons ou les atomes refroidis par laser font aussi partie des candidats *(lire l'interview p. 40)*. La mise au point de qubits intriqués n'est qu'un aspect de l'ordinateur quantique. Une autre tâche gigantesque attend les chercheurs : la correction des erreurs. *« Quelle que soit la technologie utilisée, il y a toujours des dysfonctionnements*

DÉFINITIONS

SPIN Propriété quantique d'une particule liée à sa rotation sur elle-même.

SUPRÉMATIE QUANTIQUE Capacité de l'ordinateur quantique à effectuer rapidement un calcul que les supercalculateurs classiques ne seraient pas capables de réaliser dans un délai raisonnable.

SÉBASTIEN TANZILLI RESPONSABLE DE L'ÉQUIPE PHOTONIQUE & INFORMATION QUANTIQUES, CNRS-UNIVERSITÉ CÔTE D'AZUR

« Nous anticipons déjà l'arrivée de l'ordinateur quantique »

Le coordinateur pour le CNRS de la recherche sur la physique quantique et les technologies associées décrit l'écosystème qui mènera à la mise au point d'un ordinateur quantique opérationnel.

En 2019, Google annonçait avoir atteint la suprématie quantique grâce à son processeur à 53 qubits. Sommes-nous toujours sur la même lancée ?

Il n'y a pas eu d'annonce aussi fracassante depuis, mais la lancée se poursuit sous la forme d'une amélioration constante. Google ou IBM, avec son processeur à 127 qubits annoncé en novembre 2021, continuent de progresser. Mais il ne faut pas se focaliser uniquement sur le nombre de qubits. La « révolution quantique » repose sur quatre piliers : la recherche fondamentale, le transfert industriel, le développement de marchés et la formation. Même si elles sont moins spectaculaires, des avancées se font tous les jours dans ces domaines qui sont, si je puis dire, « intriqués ».

Le nerf de la guerre reste la mise au point de qubits fonctionnels. Plusieurs technologies sont à l'étude : circuits supraconducteurs, spins dans le silicium, atomes froids… L'une d'elles se détache-t-elle ?

Non. Chacune est encore en développement, voire en déploiement pour les atomes froids et les supraconducteurs. Bien malin, donc, celui qui pourra dire laquelle permettra de construire des processeurs de plusieurs milliers de qubits. Bien sûr, le spin dans le silicium, issu de la microélectronique, offre des perspectives de miniaturisation et donc la possibilité d'en mettre un plus grand nombre sur un processeur. *Idem* pour les circuits supraconducteurs. Mais pour l'instant, il s'agit de faire foisonner l'ensemble des technologies, dans l'espoir de découvertes qui permettront une véritable rupture.

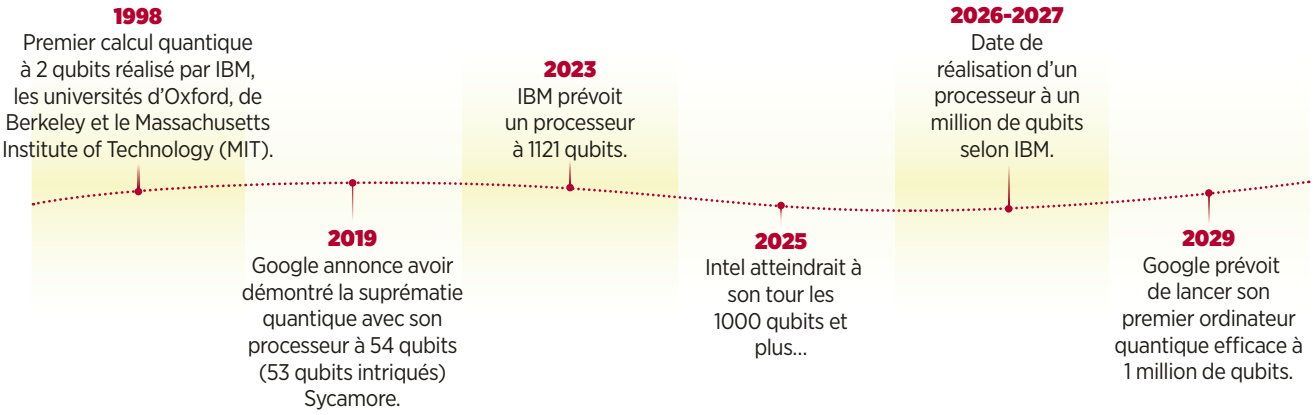
UNS

En janvier 2021, le président Macron a exposé la stratégie nationale quantique. Prépare-t-on un ordinateur quantique à la française ?

Non, mais il y a un écosystème à la française. En recherche fondamentale, nous avons plusieurs pôles d'excellence, remontant aux années 1980, qui se retrouvent aujourd'hui en première ligne. C'est le cas des atomes froids [travaux de Claude Cohen-Tannoudji, prix Nobel 1997] et les interactions lumière/matière [travaux de Serge Haroche, prix Nobel 2012]. Côté industrie, plusieurs groupes français de premier plan comme Airbus, Thales, EDF s'intéressent au sujet et offriront un marché aux technologies quantiques, pour la gestion des flux d'énergie par exemple, la mise au point de nouveaux matériaux… Par ailleurs, l'écosystème français bénéficie de la présence de plusieurs start-up remarquables. Enfin, en janvier, nous avons lancé la plateforme nationale de calcul quantique hybride. Il s'agit de marier un processeur classique avec un processeur quantique. Cette hybridation va donner un aperçu de la puissance des calculateurs quantiques aux laboratoires, aux start-up et aux industriels afin qu'ils puissent se l'approprier, et imaginer de nouveaux débouchés. L'ordinateur quantique n'est pas encore là, mais il faut anticiper son arrivée. ■

Propos recueillis par F. N.

La course aux qubits s'accélère



de qubits à cause de la décohérence. Ce qui entraîne des erreurs dans les calculs. Nous développons donc des techniques pour anticiper ces erreurs et les corriger », explique Tristan Meunier. En langage technique, cela signifie mettre au point des codes correcteurs d'erreurs, inspirés de ceux utilisés pour l'ordinateur classique, dont les bits ne sont pas infaillibles non plus. Mais avec les qubits, les chercheurs sont confrontés à une difficulté supplémentaire : il n'est pas possible de lire directement l'information stockée sur un qubit sans détruire celle-ci. Car l'interaction directe avec un qubit entraîne sa décohérence. Alors, sans possibilité d'accéder au qubit, comment savoir s'il défaille ? *« Pour résoudre ce problème, une des solutions est de rajouter des qubits,* explique le chercheur. *Le principe est d'avoir d'un côté des qubits dits data, qui effectuent les calculs, et de l'autre des qubits dits mesures qui sont en quelque sorte des contrôleurs. Grâce à l'intrication, on crée à partir de ces qubits physiques des qubits logiques, sur lesquels les erreurs peuvent être contrôlées et corrigées. Hélas, ces qubits supplémentaires ajoutent aussi de la complexité.* » On estime en effet qu'il faut entre 1000 et 10 000 qubits physiques par qubit logique ! Cette inflation condamne donc les processeurs quantiques à intégrer des milliers voire des dizaines de milliers de qubits. On comprend mieux pourquoi ceux que l'on peut *a priori* miniaturiser, comme les circuits supraconducteurs ou les électrons dans le silicium, présentent un intérêt certain…

Pour un industriel comme IBM, la cause semble ainsi entendue, même si l'entreprise américaine étudie toujours plusieurs types de qubits. *« Les qubits supraconducteurs représentent la technologie quantique générique la plus prometteuse,* affirme Pierre Jaeger. *Notre objectif est de travailler avec notre écosystème de développeurs, de scientifiques et d'experts de l'industrie afin de démontrer l'avantage quantique, c'est-à-dire le moment où les ordinateurs quantiques seront soit moins chers, soit plus rapides, soit plus précis que les ordinateurs classiques pour une tâche donnée. Nous pensons atteindre ce moment lorsque nous disposerons d'un processeur de plus de 1000 qubits, ce qui devrait intervenir en 2023.* »

Un enthousiasme que tient à tempérer Tristan Meunier, même s'il reconnaît que la période est assez euphorisante. *« Nous sommes à un moment charnière où les qubits nés dans les laboratoires il y a quelques années sont récupérés par les industriels qui boostent tout le secteur. C'est une bonne chose car le développement de l'ordinateur quantique est une tâche colossale que la recherche publique n'aura pas les moyens de mener à bien seule. Mais quand parviendrons-nous à l'avantage quantique ? De quelle manière mettra-t-on cette machine au service de la société ? On déploie beaucoup de moyens pour répondre à ces questions et c'est bien.* » ■

F. N. @ fnicot07

ÉNERGIE

Une nécessaire maîtrise de la consommation

L'ordinateur quantique devrait être sobre. *« Puisqu'il demande moins d'opérations physiques, le calcul quantique consomme moins,* explique Alexia Auffèves, physicienne à l'institut Néel, à Grenoble. *De plus, la logique quantique est réversible, ce qui pourra aussi jouer sur l'efficacité énergétique. »* Voilà pour la théorie. En pratique, les codes correcteurs d'erreurs utilisés pour pallier la défaillance des qubits, ou les installations cryogéniques pour les refroidir, feront monter l'addition. Tout l'enjeu est de savoir de combien. *« Le monde de la recherche et nos décideurs en prennent conscience,* poursuit la chercheuse. *On ne peut pas développer l'ordinateur quantique à n'importe quel prix pour la planète. Il faut donc mener de front sa mise ou point, et la maîtrise de sa consommation. »*

Du quantique à tout faire

En effectuant un grand nombre d'opérations à la fois, l'ordinateur quantique promet une puissance de calcul sans commune mesure avec les machines classiques. Les recherches fondamentale et appliquée en seront les premières bénéficiaires.

C'est une révolution qui s'annonce, mais elle se fera en douceur. Le bon vieil ordinateur à bits classiques, parfaitement adapté à ses tâches actuelles de bureautique ou de divertissement, trônera encore longtemps dans nos bureaux et nos salons. C'est dans les grands laboratoires de recherche que l'ordinateur quantique devrait faire son apparition d'ici à quelques années. De la chimie à la finance, en passant par la physique fondamentale, petit tour d'horizon — non exhaustif — des terrains de jeux de l'ordinateur du XXIe siècle.

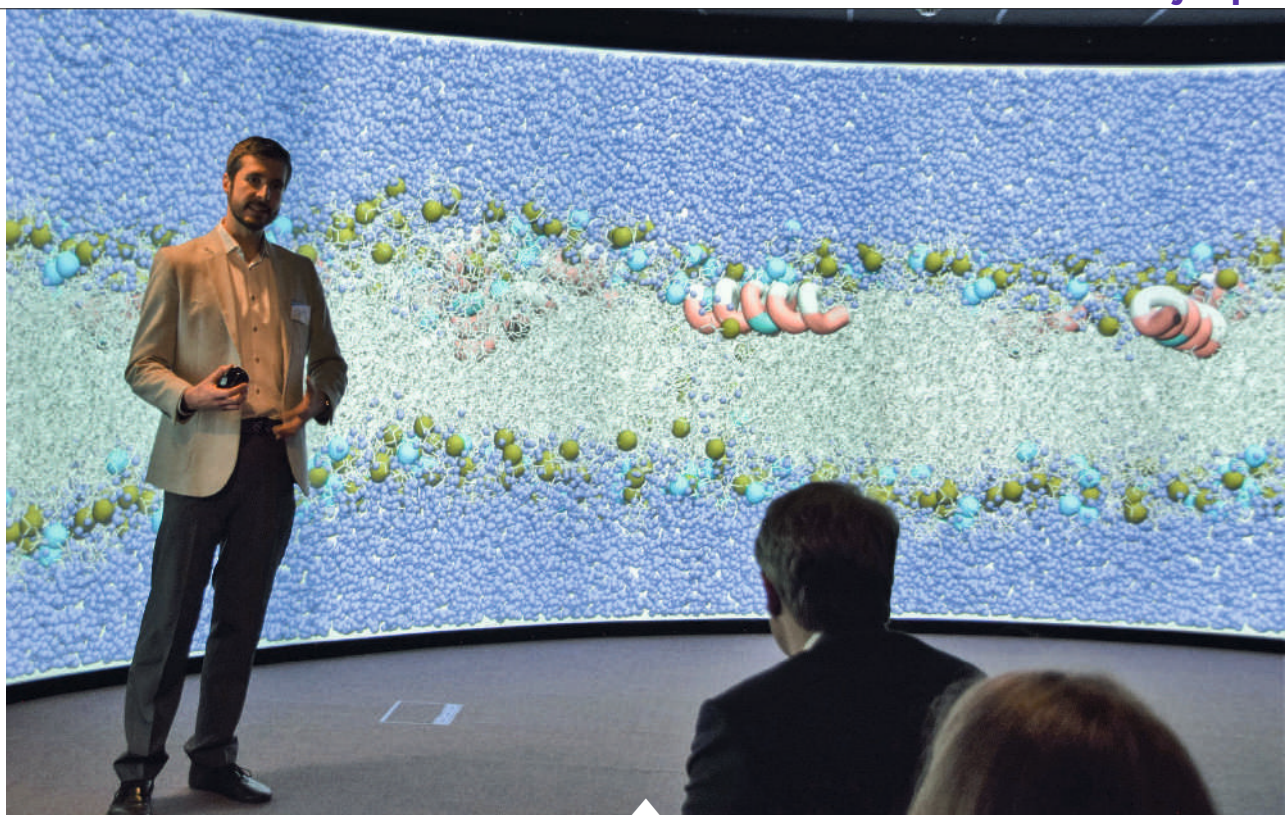
Santé
Des médicaments sur mesure

Le calcul de haute performance, à l'aide de supercalculateurs, est déjà au cœur de la recherche en chimie. *« Depuis environ vingt ans, la chimie a adopté pleinement le numérique,* explique Jean-Philip Piquemal, directeur du Laboratoire de chimie théorique (Sorbonne Université, CNRS) et cofondateur de la start-up Qubit Pharmaceuticals. *Molécules et médicaments sont en partie créés par ordinateur. Pour cela, les chimistes théoriciens essaient de résoudre numériquement les équations de la mécanique quantique. Ces calculs permettent de déterminer les propriétés de molécules, qui peuvent être très variées : l'élasticité et la résistance d'un matériau, l'interaction d'un médicament avec une protéine…* » Mais pour simuler la nature quantique de la matière, quoi de mieux qu'un ordinateur lui-même quantique ? Cette idée trouve un écho tout particulier chez les chimistes alors que de grands progrès sont sans cesse annoncés autour de la conception de cette machine. *« Ce qui est important en chimie, c'est d'être prédictif, de pouvoir comparer le calcul théorique aux résultats expérimentaux. Nous savons quel niveau de précision il faut avoir dans les équations pour être proche de la réalité. Mais nous utilisons dans de nombreux cas des approximations pour faire tourner les modèles, car plus de précision rendrait les calculs trop longs et compliqués pour les machines classiques. Avec un ordinateur quantique, il serait possible de limiter ces approximations* ». De puissants ordinateurs quantiques permettraient ainsi d'explorer le monde de la chimie comme jamais auparavant. *« Le grand gagnant sera la pharmacie. Quand vous avez une cible, par exemple le Sras-CoV-2, vous voulez savoir si un médicament va s'y accrocher pour la neutraliser. Et pour cela, vous devez résoudre une équation physique. Plus on la résout exactement, plus la prédiction est bonne. Ce que l'on va chercher à faire, c'est prédire beaucoup d'interactions entre molécules, à très grande vitesse et à très haute précision* », indique Jean-Philip Piquemal. Car il y a potentiellement des milliards de combinaisons possibles pour trouver « la bonne molécule » qui servira contre une maladie précise. Un ordinateur quantique capable d'effectuer un nombre astronomique de simulations en un temps record changerait la donne. *« La phase préclinique, où l'on conçoit les molécules, serait bien plus efficace, non seulement pour trouver la*

JEAN-PHILIP PIQUEMAL

« La conception des molécules permettra de gagner plusieurs années dans le développement d'un médicament »

Jean-Philip Piquemal, directeur du Laboratoire de chimie théorique (Sorbonne Université/CNRS) et cofondateur de Qubit Pharmaceuticals



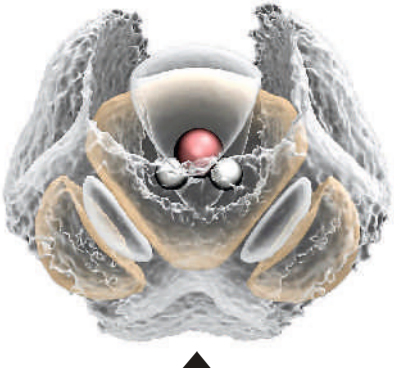
IBM RESEARCH

Les puissantes capacités de simulation de l'ordinateur quantique permettent de prévoir les propriétés de nouveaux composés médicamenteux (ici, des travaux sur la résistance aux antibiotiques présentés par Flaviu Cipcigan, chercheur chez IBM, en 2020).

bonne molécule mais aussi éliminer celles qui auraient des effets secondaires rédhibitoires. Cela peut permettre de gagner plusieurs années dans le développement d'un médicament! »

Matière Le noyau des atomes révélé

Juste retour des choses, l'ordinateur quantique devrait jouer un grand rôle dans la physique fondamentale, dont il est issu. Comme le décrit Denis Lacroix, chercheur au Laboratoire de physique des 2 infinis Irène-Joliot-Curie (université Paris-Saclay, CNRS), *« les noyaux atomiques sont formés de protons et de neutrons dont le nombre peut aller de deux à plusieurs centaines. En plus, ils sont en interaction très intense. Si beaucoup de phénomènes se produisant dans les noyaux, comme la désintégration radioactive, sont assez bien compris grâce à des modèles issus de l'expérimentation, la tendance est de les étudier en faisant des calculs exacts, à partir de l'interaction forte et faible à l'œuvre dans le noyau atomique. Actuellement, les ordinateurs traitent de manière satisfaisante des problèmes de 15 à 20 particules maximum* ». Un ordinateur quantique simulera des systèmes avec davantage de particules.



IBM RESEARCH

Les algorithmes quantiques simulent de façon très fine le comportement des molécules (ici des molécules d'eau).

Les possibilités pour la physique nucléaire ne s'arrêtent pas là : *« Les noyaux sont comme des gouttes liquides qui peuvent prendre de nombreuses formes (ballon de rugby, poire…). Aujourd'hui, il est possible de décrire des systèmes comptant deux ou trois types de déformations tout au plus. Les machines quantiques dépasseront cette limite et exploreront beaucoup plus de configurations, avec des répercussions dans la description de la dynamique des noyaux : collisions entre ions lourds, fission nucléaire…* », explique le physicien. Ces travaux auront-ils des conséquences sur les technologies du nucléaire ? Il est encore trop tôt pour le dire.

En revanche, voici un domaine où le quantique est déjà là : le traitement de données. Des scientifiques du Cern, à Genève, en collaboration avec des entreprises comme IBM, ont montré que les algorithmes quantiques pouvaient d'ores et déjà rivaliser avec les meilleurs algorithmes classiques. *« Pour trouver*

ANDY SPROLES/OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, U.S. DEPT. OF ENERGY.

Simulation du noyau atomique du deutérium (formé d'un proton, en rouge, et d'un neutron, en bleu) obtenue grâce à un ordinateur quantique.

une information parmi la quantité gigantesque de données produites lors des collisions entre particules au LHC (1 pétaoctet [10^{15} octets] *par seconde !), on utilise du* machine learning, *ou l'apprentissage automatique. Ce sont des algorithmes permettant à une intelligence artificielle de "s'entraîner" à réaliser une tâche (par exemple trier des données) en utilisant des données déjà connues. Il a été montré qu'un algorithme généraliste adapté au quantique fait aussi bien que les algorithmes classiques du Cern spécialement conçus pour détecter les particules* », indique Xavier Vasques, d'IBM France. Des résultats qui ne sont pas que théoriques, mais bien testés grâce aux premiers processeurs quantiques sortis des laboratoires d'IBM et de ses concurrents (Intel, Google), et au moyen de simulateurs de calculs quantiques.

Matériaux
Des simulations à très petite échelle

Fabriquer de nouveaux matériaux avec des propriétés choisies en fonction de leurs applications. Un rêve que l'ordinateur quantique permettra de toucher du doigt. Les exemples abondent : engrais plus « propres », catalyseurs pour la capture du dioxyde de carbone et même nouvelles batteries, comme l'illustre Xavier Vasques, d'IBM : « *Nous travaillons avec Daimler* [la maison mère de Mercedes-Benz] *pour concevoir les batteries du futur. On s'intéresse par exemple au lithium-soufre, un couple très étudié. Nos équipes ont montré que l'on pouvait simuler ces molécules et leurs interactions, avec un gain de temps considérable sur les machines quantiques puisque l'on passe de 290 jours à 7 heures pour une simulation que l'on a réellement testée !*

PASCALE SENELLART-MARDON

DIRECTRICE DE RECHERCHE AU CENTRE DES NANOSCIENCES ET NANOTECHNOLOGIES (CNRS/UNIVERSITÉ PARIS SACLAY)

« Il faut créer un lien efficace entre recherche académique et start-up »

« Nous sommes à un tournant où les applications quantiques ne pourront pas être développées uniquement dans les laboratoires académiques car cela coûterait trop cher. Cela se voit déjà à l'international, à l'exception peut-être de la Chine. C'est donc le bon moment pour la France de confier au privé les découvertes académiques afin de les transformer en applications. Cette nouvelle étape passe par la création de start-up, qui valorisent une partie des savoirs, les rendent utilisables et mettent en place la démarche d'industrialisation, très complexe en quantique. Mais de nouvelles découvertes sortent sans cesse des laboratoires : la recherche fondamentale nourrit ainsi l'écosystème quantique en continu. Il faut donc créer un lien efficace entre le monde académique, les start-up, les industriels… Les investisseurs en sont conscients, c'est une bonne chose. Et la recherche y gagne aussi ! Les progrès réalisés dans les start-up arrivent en retour dans les équipes académiques et permettent de concevoir de nouvelles expériences. Ce qui m'inquiète, c'est la différence de temporalité. Le monde industriel va très vite, et c'est important pour la compétition internationale. Mais au niveau académique, cela prend du temps de faire des découvertes, de former les cerveaux… Il y a aussi le problème de l'attractivité : en France, le métier de chercheur est délaissé car il y a peu de moyens, une pénurie de postes et, bien sûr, les salaires ne sont pas les mêmes que dans le privé. » ■

Propos recueillis par C. P.

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

Avec une meilleure compréhension de ces molécules, on espère concevoir des batteries avec plus de cycles de recharge et qui durent aussi plus longtemps, fabriquées avec des matériaux moins toxiques que ceux utilisés actuellement. »
Une simulation du comportement de la matière à de très petites échelles peut aussi avoir des effets sur de très grandes échelles, comme le résume Marc Porcheron, à la tête du projet Informatique et technologies quantiques d'EDF : « *Nous utilisons beaucoup les simulations pour analyser l'évolution dans le temps des structures (métaux, bétons…) qui se trouvent dans les centrales nucléaires. Elles peuvent être soumises à de très hautes températures ou des radiations, et l'on a besoin de prévoir ce qui se passe à l'intérieur sur le temps long, pour prendre les mesures de sécurité adéquates.* » Des idées qui peuvent aussi s'appliquer aux barrages hydroélectriques.

Réseaux
L'optimisation à tout va

La capacité de l'ordinateur quantique à gérer de nombreux paramètres s'utilise aussi à notre échelle. Marc Porcheron, d'EDF, détaille : « *Toutes les centrales électriques ne fonctionnent pas en permanence, leur activité est liée par exemple à la consommation des ménages et des industries à l'instant T. Pour décider de les arrêter ou les démarrer, il faut prendre en compte la demande, les contraintes des centrales (maintenance, rechargement…), la production d'origine renouvelable… Nous devons, sur la base de ces paramètres, décider si l'on ouvre la vanne d'un barrage, si l'on démarre telle ou telle centrale au gaz… Les algorithmes quantiques pourraient permettre des prises de décision plus rapides et précises, ce qui représente un gain de temps, d'argent, et renforce la confiance dans la sécurité et la fiabilité du système électrique.* » Ils devraient aussi améliorer la précision des études de probabilités, par exemple sur la défaillance des centrales électriques : « *Ces études répondent à des questions du type "quelle est la probabilité que tel événement se passe (une défaillance par exemple) si un premier événement survient ?". On construit des "arbres d'événements" qui deviennent vite gigantesques. Les algorithmes quantiques permettront de les explorer et de calculer les probabilités associées à chaque événement plus rapidement et efficacement.* »
Autre exemple d'optimisation, les bornes de recharge rapide pour les véhicules électriques. « *Avec des centaines de milliers de véhicules et des milliers de bornes, pouvoir indiquer à chaque conducteur vers laquelle se diriger, en fonction de la charge des batteries, de la position du véhicule, est très complexe à résoudre par le calcul. Là encore, les algorithmes quantiques permettront de régler ces problèmes plus efficacement.* » Enfin, ce type d'applications intéresse bien au-delà d'EDF, comme en témoigne un partenariat d'IBM avec ExxonMobil pour améliorer le transport maritime de carburant. Trafic routier, chaînes de production… Ce n'est sans doute que le début d'une vaste optimisation des réseaux, de toute nature !

Finance
Toujours plus vite

L'informatique a une place centrale dans le monde de la finance : les transactions *(trading)* à haute fréquence, consistant à acheter et vendre des actions dans des laps de temps très courts pour profiter au maximum du marché, utilisent des algorithmes complexes très demandeurs en puissance de calcul. Analyser encore plus rapidement les fluctuations de la Bourse, simuler le comportement du marché plus vite que les concurrents à partir d'un nombre croissant de données. semblent ainsi dans les cordes de l'ordinateur quantique…
Ces atouts n'ont pas échappé aux acteurs de la finance. Les équipes de la banque espagnole BBVA et de la start-up Multiverse computing ont par exemple publié au début de cette année un article sur l'optimisation d'investissements en utilisant des algorithmes quantiques. Ce n'est probablement que le début d'une vague de publications qui va développer la « finance quantique ». ■ **C. P.**

ALGORITHMES

La programmation quantique… à la maison !

Et si demain vous appreniez à programmer en quantique ? Des ressources existent déjà pour s'y exercer, accessibles grâce à une simple recherche sur Internet ! Microsoft et son langage Q# (prononcer Q sharp), les outils Qiskit d'IBM et Cirq de Google (qui permettent de programmer du quantique en langage Python) : ils sont *open source* et ont de nombreux tutoriels en ligne (en anglais pour la plupart). Bien sûr, avoir de solides notions en mathématiques (en algèbre linéaire notamment) et en programmation est indispensable, surtout si l'on veut développer ses propres algorithmes. Mais il existe aussi des usages simplifiés telle l'interface Drag & Drop chez IBM, ou des algorithmes quantiques déjà construits et simplement « à intégrer » dans des programmes plus vastes : de quoi créer son générateur de nombres aléatoires ou mettre en œuvre un algorithme de recherche dit de Grover pour trouver un mot-clé rapidement parmi toute une liste. Et pourquoi pas, ensuite, tester ses programmes sur de vrais ordinateurs quantiques (ou des simulateurs). IBM Quantum, Microsoft Azure Quantum, Google Quantum Computing service… Des solutions de *cloud* permettent d'avoir accès à ces machines. Le domaine connaît ainsi une émulation semblable au début de l'informatique, avec une facilité (relative) d'accès inédite.

L'ordinateur quantique défie la cryptographie

Une telle machine rendrait obsolète nombre de chiffrements actuels. D'où l'urgence d'adapter les systèmes existants et de développer des outils en utilisant, là aussi, les principes de la physique quantique.

Des centaines, des milliers, voire des millions d'années… C'est le temps nécessaire aux plus puissants supercalculateurs pour « casser » les protocoles de cryptage actuels. Ceux-ci sécurisent nos messageries, comptes bancaires, données médicales, etc. Ils reposent sur des opérations mathématiques, comme la décomposition de très grands nombres en nombres premiers (divisibles uniquement par 1 et eux-mêmes). Or, l'algorithme de Shor, inventé en 1994 par le mathématicien américain Peter Shor, permet d'exploiter les propriétés uniques de la mécanique quantique comme la superposition *(lire p. 36)* pour effectuer ces opérations en un temps record.

Adieu la confidentialité ? Pas encore, heureusement. Les prototypes actuels d'ordinateurs quantiques n'ont pas la puissance suffisante pour exécuter efficacement de tels algorithmes : il leur faudrait des milliers de qubits, voire plus, pour devenir une menace. Mais les laboratoires et entreprises préfèrent se préparer à l'avènement annoncé d'une telle machine… d'autant qu'un autre problème de taille se pose : des données sécurisées actuellement ne le seront peut-être plus demain. En effet, si un pirate ayant sauvegardé ces données aujourd'hui acquérait dans le futur un ordinateur quantique, il serait alors en mesure de les déchiffrer *a posteriori*. Il s'agit donc d'une véritable menace pour des données que l'on souhaiterait confidentielles sur le long terme (accords commerciaux, secrets d'États…). Une raison supplémentaire pour passer à une cryptographie « résistante au quantique ».

Pourquoi, dès lors, ne pas utiliser directement la cryptographie quantique pour se protéger ? Celle-ci consiste à utiliser les propriétés physiques d'objets quantiques (en général des photons, qui constituent la lumière) grâce à des systèmes optiques (fibre optique, laser…) : ce n'est plus de l'informatique quantique, mais cela reste de la physique quantique. Car la sécurité est en l'occurrence issue directement des lois de la mécanique quantique, qui stipulent qu'il est impossible d'interagir avec un objet quantique sans affecter ses propriétés. Ainsi, un « espion » qui tenterait d'intercepter une communication se trouverait immédiatement démasqué, car le récepteur constaterait tout de suite que l'objet quantique a été modifié.

Veiller à l'hybridation avec les systèmes classiques

Pour Eleni Diamanti, directrice de recherche au LiP6 (Laboratoire d'informatique de Sorbonne Université), *« du point de vue technologique, nous n'avons donc pas besoin d'ordinateur quantique pour faire de la cryptographie quantique. Du point de vue des applications, la mise en place d'un tel ordinateur rend la pertinence de la*

CRYPTOMONNAIES

La « blockchain » vulnérable ?

La *blockchain* et ses applications comme les cryptomonnaies, très en vogue en ce moment, fondent une partie de leur popularité sur leur inviolabilité. Une remise en cause de cette dernière par l'ordinateur quantique leur porterait un coup dur. Des premières études ont analysé leur vulnérabilité, et concluent : la *blockchain* est attaquable par un ordinateur quantique. En particulier, les fonctions de signature, d'authentification, sont sensibles à l'algorithme dit de Shor. Étant donné les enjeux financiers, la défense s'organise : CryptoNext Security a par exemple développé une version de la *blockchain* Corda résistante aux attaques quantiques.

LUKE MACGREGOR/BLOOMBERG VIA GETTY IMAGES

La sécurisation des données est réalisée grâce à la cryptographie, une technique qui doit pouvoir résister aux cyberattaques (ici, formation à la prévention dans le camion itinérant X-Force Command d'IBM).

cryptographie quantique plus évidente. Il faudra aussi veiller à son hybridation avec les systèmes classiques. » Des entreprises comme ID quantique (Suisse) ou MagiQ (États-Unis) vendent déjà des dispositifs commerciaux de cryptographie quantique pour sécuriser des réseaux. Mais rien ne dit qu'il sera possible de passer à très grande échelle, au niveau national par exemple.

Adapter les systèmes existants reste ainsi une nécessité. De ce besoin est née la cryptographie dite post-quantique : « *Si un ordinateur quantique suffisamment puissant était à disposition d'une personne malveillante ou d'un groupe, rien ne dit que nous disposerions immédiatement d'une machine équivalente. Nous sommes donc dans un scénario où des communications classiques doivent rester sûres face à un attaquant quantique* », explique Damien Stehlé, professeur à l'École normale supérieure de Lyon et chercheur dans ce domaine. Une idée prise très au sérieux par les institutions comme le National Institute of Standard and Technology (Nist). Cette instance américaine qui gère notamment les normes de cybersécurité a ainsi lancé en 2016 un concours pour déterminer un nouveau standard de cryptographie résistante au quantique, dont les résultats seront révélés prochainement.

Mettre en œuvre de nouveaux algorithmes performants

Ces nouvelles méthodes de chiffrement s'appuient sur des objets mathématiques, tels les réseaux euclidiens décrits par Damien Stehlé comme les colonnes d'une matrice. Avec ces réseaux, fini le chiffrement par factorisation de nombres premiers. Des problèmes mathématiques d'une nature différente sont à l'œuvre. Pour comprendre, prenons un réseau, c'est-à-dire une grille régulière infinie. Vous devez déterminer le point du réseau le plus proche d'une « cible » située à proximité. Afin de résoudre ce problème, tous les algorithmes connus — y compris quantiques — ont un temps de calcul qui augmente exponentiellement en fonction de la dimension du réseau. Il reste maintenant à intégrer ces outils dans les applications grand public et industrielles. « *Un des enjeux consiste à compléter la cryptographie existante par une couche de sécurité résistante au quantique,* explique Florent Grosmaitre, patron de la start-up Cryptonext Security. *Un autre est de mettre en œuvre ces algorithmes de manière performante et sécurisée, sans qu'ils consomment trop de ressources* », car il ne faut pas que cette surcouche de protection nuise trop aux performances des applications. « *Il y a toujours un impact, mais quand la mise en place des algorithmes est bien optimisée, il est très faible* », assure Jean-Charles Faugère, cofondateur de Cryptonext Security et ancien directeur de recherche à l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria). Un défi de développement et d'intégration que laboratoires et entreprises font tout pour relever aujourd'hui. ■ **C. P.**

@Corentin_Pail

INRIA / B. FOURRIER

« Nous sommes dans un scénario où des communications classiques doivent rester sûres face à un attaquant quantique »

Damien Stehlé, professeur à l'École normale supérieure de Lyon, membre du Laboratoire d'informatique du parallélisme (CNRS/ENSL)

ARNOLD JEROCKI/DIVERGENCE

Installé au milieu de 4,3 kilomètres de tunnels, jusqu'à plus de 500 mètres de profondeur, le Laboratoire souterrain à bas bruit bénéficie de conditions environnementales uniques pour mener des expériences scientifiques.

500 mètres sous terre, la science à bas bruit

Situées sous un ancien site militaire, les galeries à l'abri de toute pertubation extérieure du Laboratoire souterrain à bas bruit offrent aux géologues, physiciens, ou neuroscientifiques un sanctuaire idéal pour y mener leurs travaux. Dernier projet en date : un nouveau détecteur d'ondes gravitationnelles. Reportage dans le Vaucluse.

Par Franck Daninos @fdaninos

C'est un site scientifique unique au monde, un terrain de jeu exceptionnel pour les centaines de chercheurs qui l'utilisent chaque année. Il est localisé à une bonne heure de route d'Avignon (Vaucluse). On le rejoint en traversant les paysages bucoliques du Luberon jusqu'à arriver à Rustrel, commune de quelques centaines d'habitants connue pour ses magnifiques carrières d'ocre à ciel ouvert, le Colorado provençal. L'installation est nichée elle-même à 2 kilomètres du village, sur le flanc de la Grande Montagne. Avec, tout autour, une haute clôture en fil de fer barbelé trahissant son passé militaire. *« Ce n'est plus une zone protégée, elle appartient aujourd'hui à la communauté de communes Pays d'Apt-Luberon. Mais nous avons conservé la clôture pour éviter les intrus. De manière générale, nous n'avons pas beaucoup touché à l'esthétique militaire »*, lâche Stéphane Gaffet, géophysicien qui dirige le Laboratoire souterrain à bas bruit (LSBB) depuis 2006.

Passé un portail, la route débouche sur une structure bétonnée aux allures de blockhaus. Jusqu'en 1996, elle permettait d'accéder à l'un des postes de tir de la force de frappe nucléaire française, creusé au cœur de la montagne sous un demi-kilomètre de roche. *« C'est dans cette installation souterraine, isolée de toutes perturbations extérieures, que nous réalisons depuis une vingtaine d'années une variété de recherches : en physique des particules, sismologie ou encore*

en neurosciences », énumère Stéphane Gaffet. Les dizaines de caisses parquées devant l'entrée témoignent pourtant d'une agitation inhabituelle. Acheminées depuis Nice, Paris ou Bordeaux, elles contiennent les pièces d'un instrument inédit en cours d'assemblage. Objectif : « *Profiter de l'environnement extrêmement calme du LSBB pour mesurer d'infimes soubresauts de l'espace-temps et développer la prochaine génération de détecteurs d'ondes gravitationnelles* », se réjouit le chercheur.

Le site faisait partie d'un complexe militaire beaucoup plus vaste, dit du plateau d'Albion, qui s'étendait sur 800 km², soit environ huit fois la taille de Paris *(lire l'interview p. 52)*. Au cœur du dispositif : 18 missiles sol-sol enfouis dans des silos et équipés de têtes nucléaires, qui pouvaient atteindre des cibles à plus de 3500 km. La base d'Apt-Saint-Christol, où stationnaient 2000 hommes, devait les sécuriser et les maintenir opérationnels. Mais ces armes ne pouvaient être actionnées que par des postes de tir souterrains : l'un à Rustrel, l'autre 30 km plus au nord sur l'un des versants du mont Ventoux. Ces installations comprenaient plusieurs kilomètres de tunnels « subhorizontaux » : « *On ne descend pas sous la montagne, c'est elle qui monte au-dessus de nous* », résume Stéphane Gaffet. Les tunnels conduisaient eux-mêmes à une salle blindée en forme de capsule. Conçue pour résister à une attaque nucléaire, elle devait pouvoir lancer une riposte même si tout était anéanti en surface. « *Des officiers s'y relayaient 24 h sur 24, prêts à recevoir l'ordre présidentiel et appuyer sur le bouton nucléaire* », raconte Daniel Boyer, directeur adjoint du LSBB et ancien militaire qui a servi au poste de Rustrel jusqu'à ce que l'armée l'abandonne.

NEUROSCIENCES

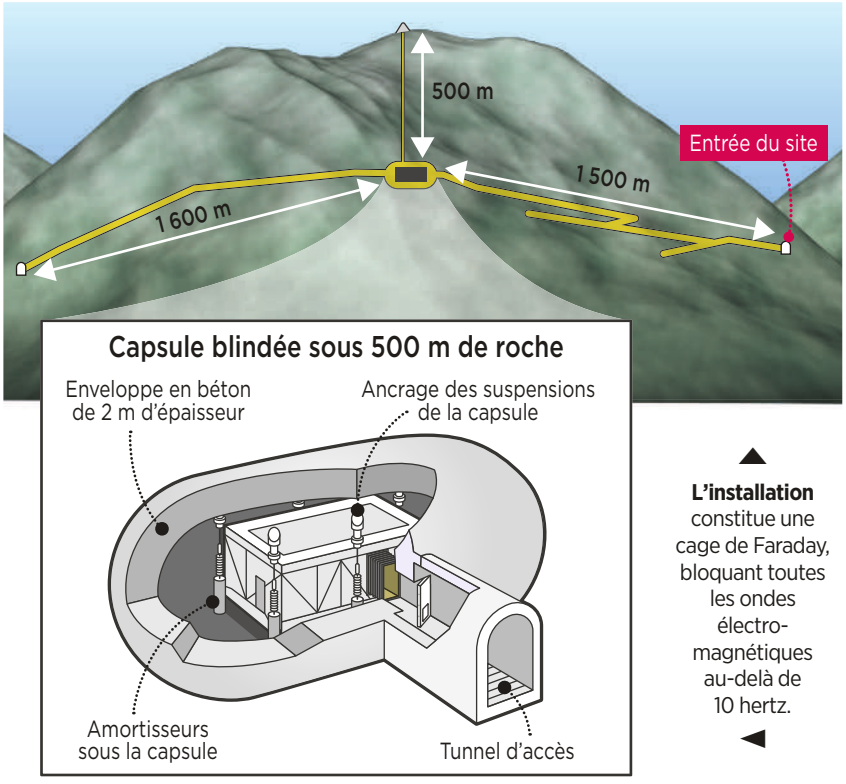
Détecter les bruissements du cerveau

Des électroencéphalogrammes mesurant avec une sensibilité inédite l'activité du cerveau. C'est l'un des objectifs du projet de recherche international mené par le CNRS et l'université de la Colombie-Britannique (Canada), qui a débuté en février 2021 au LSBB. Dans la capsule du laboratoire, le niveau de bruit électromagnétique est en effet cent fois moindre que celui du cerveau dans sa phase de sommeil profond ! Un endroit rêvé pour scruter les moindres tressaillements de notre encéphale, à l'écart du bruit des machines en milieu hospitalier. Les chercheurs viseront notamment à détecter des signaux précurseurs des crises d'épilepsie et de maladies dégénératives comme Parkinson et Alzheimer, dans la bande dite gamma (au-delà de 30 hertz) de l'activité cérébrale.

Une salle blindée conçue pour résister à une attaque nucléaire

Car à la fin de la guerre froide, le président Jacques Chirac décide de supprimer l'unique site terrestre de dissuasion nucléaire, très coûteux et moins stratégique, pour ne garder que les composantes sous-marines et aéroportées. Dès 1996, les bases du plateau d'Albion commencent à être démantelées. Le physicien Georges Waysand, du Groupe de physique des solides de l'université Paris-VII, entend toutefois parler de ces infrastructures, de Rustrel en particulier. Il y voit une formidable opportunité et multiplie les contacts avec son ministère, l'armée et les élus locaux, expliquant : « *Personne ne nous construira jamais un endroit pareil, il faut absolument le préserver pour les scientifiques* », rapporte Daniel Boyer.

Le site de Rustrel bénéficie en effet d'un très faible niveau d'interférences. Peu peuplée, la zone n'a accueilli aucune usine, autoroute, voie ferrée ou ligne à haute tension pendant la période militaire. Les premières perturbations dues à l'humain se situent dans la zone indus-



INFOGRAPHIES: BRUNO BOURGEOIS

L'installation constitue une cage de Faraday, bloquant toutes les ondes électromagnétiques au-delà de 10 hertz.

trielle de Cadarache, 20 km au sud-est. L'environnement souterrain garantit par ailleurs une sismicité extrêmement basse, le massif calcaire absorbant les vibrations tel un bouclier. Et la capsule se comporte comme une cage de Faraday. Grâce à son blindage fait de 2 mètres de béton et d'un acier spécial, elle bloque toutes les ondes électromagnétiques au-delà de 10 hertz. Le champ magnétique qu'on y détecte équivaut ainsi à quelques millionièmes de milliardième de teslas, soit la limite de résolution des appareils actuels. *« On ne sait pas mesurer des champs inférieurs à cette valeur-là »*, confirme Stéphane Gaffet.

Une trentaine de projets français et internationaux

C'est cette conjonction de facteurs qui rend l'endroit unique et si intéressant pour les chercheurs. Car avec un bruit de fond aussi bas, ils peuvent mesurer des signaux extrêmement ténus qui seraient imperceptibles ailleurs. Ou caractériser le bruit généré par les capteurs eux-mêmes, ce qui est très précieux pour développer de nouveaux instruments. Alors que les silos et le poste du mont Ventoux sont détruits entre 1996 et 1998, celui de Rustrel se transforme ainsi en un nouveau temple de la mesure, dirigé d'abord par Georges Waysand. *« L'armée a retiré ce qui relevait du secret militaire. Mais elle a laissé tout ce qui permet d'utiliser la capsule et les 4,3 km de galeries comme la ventilation, l'électricité ou les téléphones »*, signale Alain Cavaillou, électronicien qui travaillait à Rustrel à l'époque militaire et gère désormais le système informatique du LSBB. Peu à peu, une batterie d'instruments est implantée, notamment dans les anciennes salles techniques. Elles hébergent aujourd'hui des détecteurs de particules cosmiques, des stations hydrogéologiques ou encore des gravimètres. Des sismomètres surveillent aussi les failles actives de Provence.
Quant à la capsule blindée, elle abrite des électroencéphalogrammes *(lire l'encadré p. 50)* et un magnétomètre qui enregistre les moindres variations du champ magnétique terrestre causées par des tempêtes solaires ou des tsunamis. Une trentaine de projets français et internationaux sont ainsi menés actuellement au LSBB. *« Leurs responsables définissent des protocoles que nous mettons en pratique pour eux. Tout est géré depuis une salle de monitoring située en surface à l'entrée du laboratoire »*, précise Alain Cavaillou. Car une règle est de mise : moins il y a de monde dans les tunnels du LSBB, mieux c'est ! *« Une porte qui s'ouvre modifie la température, une présence humaine génère forcément du bruit »*, insiste Daniel Boyer. Quand les ingénieurs du LSBB (six en tout) doivent néanmoins s'y rendre — pour remplacer un composant par exemple —, ils le font de préférence à vélo ou à pied. Ou encore en voiturette électrique si du matériel doit être transporté. À bord de ces « chariots », il faudra tout de même une quinzaine de minutes pour traverser les tunnels froids et humides et atteindre la capsule, point le plus profond lové sous 518 mètres de roche. Claustrophobes s'abstenir !
Ce silence extrême a toutefois été brisé en 2019. Deux corridors de 150 mètres ont été percés au moyen d'explosifs, mettant la plupart des expériences à l'arrêt. *« Depuis la construction du site dans les années 1960, c'est la première fois que de nouvelles galeries sont creusées »*, indique Stéphane Gaffet. Situées à mi-

OPTIQUE

Un havre pour les miroirs de pointe

À partir de juillet 2022, le LSBB hébergera une nouvelle plateforme dédiée aux systèmes optiques de pointe. Elle sera utilisée par les ingénieurs de Winlight System dont le siège est à Pertuis (Vaucluse). Depuis 2001, cette société fabrique des miroirs ultraperformants pour les observations en astronomie, dans l'industrie aérospatiale et le secteur de la défense. Mais aussi pour les synchrotrons, accélérateurs de particules générant d'intenses faisceaux de rayons X. Parmi ses récentes réalisations : des miroirs intégrés au rover martien de la Nasa Perseverance ainsi qu'au spectrographe NIRSpec du télescope spatial James-Webb. *« Le polissage de nos miroirs nécessite une minutie extrême, pour les prochaines générations de synchrotrons notamment. La précision que l'on vise équivaut à l'épaisseur de trois atomes ! »* relève son directeur Philippe Godefroy. Or la caractérisation des défauts dépend elle-même des perturbations environnementales : variations de température et vibrations d'origine anthropique (usines, trains, etc.) en particulier. *« D'où l'intérêt de transférer certaines de nos activités au LSBB, à 60 m de profondeur dans une salle qui abritait les groupes électrogènes à l'époque militaire »*, note Philippe Godefroy. Une première mondiale pour ce type d'activité.

WINLIGHT SYSTEM

La précision des miroirs est liée aux perturbations environnementales.

UNIVERSITÉ D'AVIGNON

FRÉDÉRIC MONIER
PROFESSEUR D'HISTOIRE CONTEMPORAINE
À L'UNIVERSITÉ D'AVIGNON

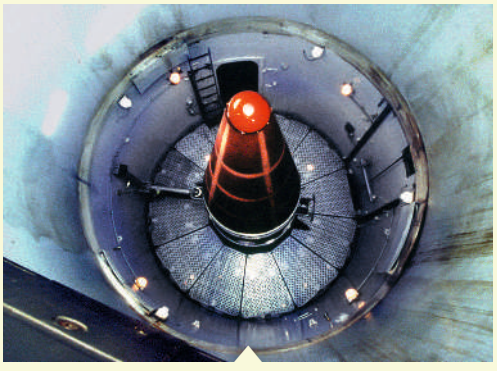
« Au cœur du secret militaire »

Le LSBB est niché dans l'ancien complexe militaire du plateau d'Albion. Pourquoi l'armée avait-elle choisi ce lieu ?
Plusieurs zones montagneuses avaient été envisagées, comme les Alpes et les Vosges, pour abriter la composante terrestre de la force de frappe nucléaire voulue par le général de Gaulle. Mais c'est le plateau d'Albion qui fut finalement choisi en 1965.
Pour des critères géologiques tout d'abord, les missiles et les postes de tir devant être enterrés. Le sous-sol d'Albion présentait en effet les bonnes caractéristiques hydrographiques. Et son calcaire était à la fois facile à travailler et suffisamment résistant pour encaisser une attaque. On estimait, en outre, que les populations locales étaient peu hostiles au pouvoir gaullien. Il fallait enfin que le complexe soit proche de la Méditerranée, considérée comme une zone dangereuse après la guerre d'Algérie.

Combien de temps ont duré les travaux ?
Plus de cinq ans, jusqu'à l'été 1971. Des centaines de milliers de mètres cubes de roche ont été extraites pour construire les silos à missiles et surtout les postes de tir enfouis jusqu'à 500 mètres de profondeur. C'était un chantier énorme !

Qui occupait les postes de tir ?
Dix militaires s'y relayaient en permanence : six commandos chargés de la sécurité, deux électroniciens pour la maintenance technique, et deux officiers qui possédaient chacun une clé actionnant les missiles. L'ordre présidentiel pouvait être transmis de dix façons différentes — notamment la télévision — afin qu'une au moins leur parvienne. Mais aujourd'hui encore, les détails ne sont pas connus. Tout comme le quotidien des officiers de tir, surtout en période de crise et quand les choses n'ont pas dû fonctionner normalement. Tout cela reste peu documenté car on se situe là au cœur du secret militaire. ■

Propos recueillis par F. D.


REUTERS

Missile nucléaire positionné dans un des silos du plateau d'Albion (1999).

chemin entre l'entrée du laboratoire et la capsule, elles ont été équipées de capteurs sismiques et de température ainsi que de fibres optiques scellées sous une dalle de béton. « *L'épidémie de Covid-19 nous a fait prendre un an de retard,* déplore le sismologue. *Mais les galeries sont désormais fin prêtes pour accueillir le nouvel instrument, le plus gros du laboratoire, dont l'assemblage débutera mi-avril.* » La machine s'appelle Miga (Matter wave laser based Interferometer Gravitation Antenna). Elle vise à développer un nouveau genre de détecteurs d'ondes gravitationnelles, ces oscillations de la trame de l'espace-temps causées par des explosions d'étoiles ou des collisions de trous noirs.

Un nouvel instrument pour capter les ondes gravitationnelles

Prédite au début du siècle dernier par Albert Einstein, leur existence a été confirmée en 2015 par l'instrument Ligo basé aux États-Unis. Il observa alors une onde gravitationnelle produite par la fusion de trous noirs à 1,3 milliard d'années-lumière de la Terre ! La détection s'est faite grâce à des lasers qui effectuent des va-et-vient entre des miroirs séparés de 4 km. En passant au travers de ceux-ci, l'ondulation contracte et allonge les distances, ce qui modifie subtilement la propagation des faisceaux. Utilisée par Ligo et d'autres interféromètres de ce type, cette technique a ouvert une nouvelle fenêtre d'observation sur l'Univers et ses plus violents cataclysmes. Mais elle n'est sensible qu'aux ondes gravitationnelles d'une fréquence comprise entre 10 et 100 hertz. Les fréquences moins élevées recèlent pourtant un intérêt majeur. « *Car plus elles sont basses, plus elles sont générées par des étoiles colossales et des phénomènes extrêmes comme des collisions de trous noirs super-massifs logés au centre des galaxies* », explique Philippe Bouyer, chercheur à l'Institut d'optique de Bordeaux qui pilote Miga. C'est dans cette gamme de fréquences, par ailleurs, que se propageraient les ondes gravita-

INGEROP, GEOS

Deux galeries ont été creusées en 2019 pour abriter le projet Miga, visant à développer de nouveaux détecteurs d'ondes gravitationnelles.

tionnelles les plus anciennes, *« jusqu'à quelques centaines de millions d'années après le Big Bang, il y a 13 milliards d'années »*, pose le physicien.
Développé par 17 laboratoires français pour un coût de 20 millions d'euros, Miga devrait ouvrir la voie à ce type de détections. Il est fondé sur une tout autre technique que Ligo : l'interférométrie à ondes de matière. Le principe ? Des atomes de rubidium sont refroidis à une température proche du zéro absolu afin de réduire au maximum leur vitesse. Ils sont lancés ensuite vers le haut et tombent en chute libre, à l'instar d'une fontaine. Un laser sépare alors les atomes en deux paquets : ils empruntent ainsi des chemins distincts avant de se recombiner et former un mélange. *« Or le passage d'une onde gravitationnelle affectera diversement chacun des paquets qui, en se recombinant, produiront différentes populations d'atomes. Des ondulations d'une fréquence allant de 0,1 à 10 hertz devraient pouvoir ainsi être décelées »*, escompte Philippe Bouyer.
Miga ne sera toutefois qu'un démonstrateur. Car pour identifier et caractériser ces ondulations à basses fréquences, il faudra des dizaines de fontaines atomiques placées sur un interféromètre de 30 km de long ! Baptisé Elgar (European Laboratory for Gravitation and Atom-interferometric Research), un tel instrument coûtera probablement des centaines de millions d'euros et ne sera pas construit avant les années 2030. Miga est donc un prérequis. Une étape indispensable qui validera cette technique grâce à cinq fontaines positionnées sur des faisceaux de 150 mètres. Pour tester le dispositif, la collaboration avait néanmoins besoin d'un environnement où les vibrations sismiques et anthropiques sont réduites au minimum. D'où le choix du LSBB, où les chercheurs apprendront à distinguer la signature d'une onde gravitationnelle des oscillations résiduelles, causées par le champ gravitationnel terrestre notamment. *« Il n'y a certes ni lumière du jour, ni fenêtre. Et la porte est plus éloignée que dans un laboratoire ordinaire,* plaisante Philippe Bouyer. *Mais c'est un endroit aussi fascinant qu'exceptionnel où la science des ondes gravitationnelles réalisera sous peu d'importantes avancées.* » Les premiers résultats de Miga sont en effet attendus pour la fin 2022. ■

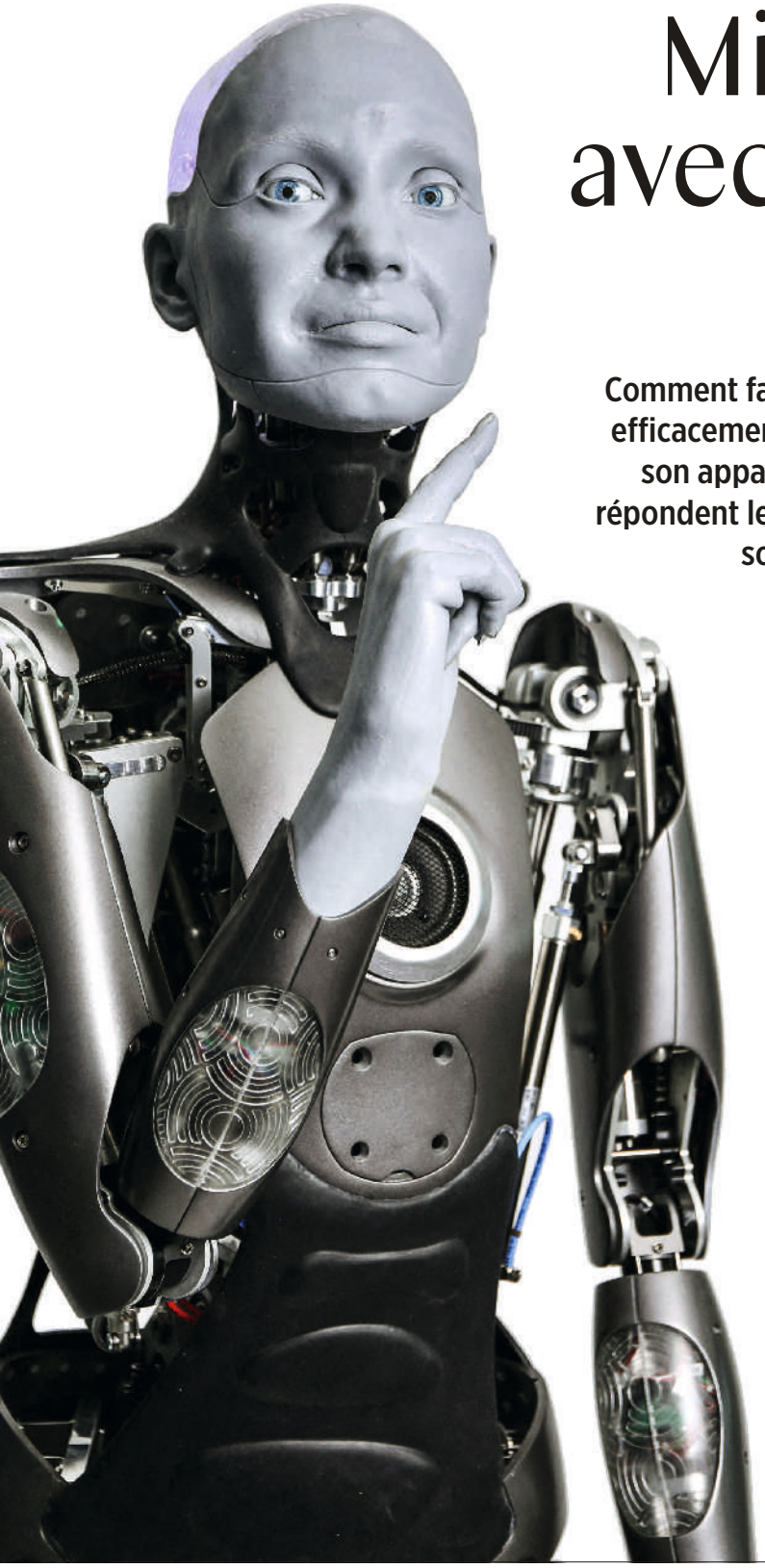
WIKIPEDIA.CC

« C'est un endroit fascinant où la science des ondes gravitationnelles réalisera sous peu d'importantes avancées »

Philippe Bouyer, chercheur à l'Institut d'optique de Bordeaux, coordinateur du projet Miga

Mieux vivre avec les robots

Comment faire pour qu'une machine interagisse efficacement avec un humain ? Il faut optimiser son apparence et la modulation de sa voix, répondent les chercheurs, mais certains éléments sont parfois contre-intuitifs.



Ameca, développé par la société britannique Engineered Arts, est doté d'une tête extrêmement mobile et d'une peau synthétique. Le robot cligne des yeux, sourit, lance des regards en coin, s'étonne… ◄

JLPPA/BESTIMAGE

Sur une allée du CES 2022, le grand salon de la high-tech à Las Vegas (États-Unis), qui s'est tenu en janvier, Ameca accueille les visiteurs. Sourire timide, regard qui accroche les passants, hochements de tête… L'attitude n'aurait rien d'étonnant si Ameca n'était pas un robot. Présenté par la société britannique Engineered Arts, cet androïde est conçu spécialement pour produire des expressions faciales subtiles et nuancées. Équipé d'une caméra dans chaque œil et de micros dans les oreilles, Ameca se tourne vers son interlocuteur. Si ce robot n'est qu'un buste statique, son imitation de l'humain est troublante.

Cette prouesse technique n'est pas isolée. Un laboratoire de l'université Columbia à New York (États-Unis) a par exemple mis au point Eva, une tête humanoïde couverte de peau synthétique (bleue !) capable d'adopter en temps réel les mêmes expressions qu'une personne lui faisant face. Le brouillage de la frontière entre l'humain et le robot a donné naissance dès 1970 à un célèbre concept, la « vallée de l'étrange ». Il fait référence au malaise ressenti face à un être artificiel anthropomorphe, dû à des imperfections incohérentes avec sa nature humaine *(lire l'encadré p. 56)*. Certes,

au quotidien, nous sommes encore loin de ces scènes de films montrant des interactions fluides avec des machines androïdes. Au contraire : un hôtel japonais s'est séparé, début 2019, de robots assistant les clients pour cause de fiasco technique, de même qu'un magasin d'Édimbourg (Écosse) en 2016. Pourtant, la relation avec les machines nourrit déjà des questionnements, à la croisée de la psychologie, des neurosciences et de la technologie, allant bien au-delà des seules notions d'adhésion ou de rejet. Pour théoriques qu'ils soient, ces travaux sont cruciaux pour penser les machines futures. Notamment en ce qui concerne leur aspect.

Le « regard » de l'humanoïde perturberait l'humain

Car la version purement humanoïde d'un robot n'a pas pour seul défaut de générer un malaise. Elle peut aussi être contre-productive. Dans une étude présentée en février 2021, des spécialistes de sciences cognitives de l'université d'Helsinki (Finlande) ont par exemple démontré que pour une même décision faite par une machine, plus celle-ci aura une apparence humaine, plus son choix sera jugé immoral. Dans une autre expérience, une équipe de l'Institut italien de technologie, à Gênes, a fait jouer 40 participants contre le robot iCub au « jeu du poulet », dans lequel les concurrents foncent en voiture — ici, virtuelle — l'un sur l'autre, le perdant étant le premier qui dévie sa trajectoire pour éviter la collision. « *Dans cette expérience, le comportement du robot était indépendant du regard qu'il portait sur les participants* », explique Marwen Belkaid, expert en robotique et sciences cognitives, coauteur de cette étude. Inutile donc d'observer la machine pour la faire faillir. « *Néanmoins, la concentration des joueurs était perturbée lorsque le robot les regardait.* » Plus précisément, faire abstraction du regard du robot demande de fournir un effort supplémentaire à celui de se concentrer sur sa propre stratégie de jeu. Ce qui n'est pas le cas avec des contacts visuels moins fréquents. Les conclusions pratiques de cette expérience sont immédiates. « *Dans les industries où l'humain et le robot coopèrent, le regard du second pourrait perturber la réalisation de la tâche du premier* », indique Marwen Belkaid.

PSYCHOLOGIE

Le biais de genre dans les machines

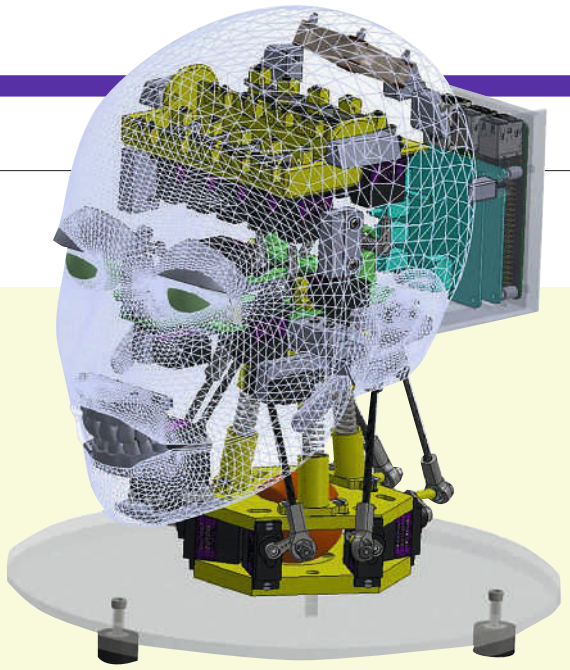
En mai 2019, un rapport de l'Unesco pointait la tendance des fabricants à féminiser les interfaces vocales. Ce choix pose plusieurs problèmes, selon l'organisation : il diffuse un modèle d'expression féminine, une telle entité est placée dans un rapport de soumission et, plus sournoisement, celle-ci devient l'incarnation des bugs techniques et autres imperfections du service. L'Unesco préconise de développer des interfaces à genre neutre. Elle recommande aussi que les assistants vocaux annoncent au préalable à l'utilisateur qu'ils ne sont que des machines.

Dans ce projet, les chercheurs n'ont pas essayé de savoir si les résultats auraient été différents avec un robot moins humanoïde qu'iCub. Mais certains travaux montrent justement que l'apparence n'est pas toujours un critère pour expliquer les réactions humaines. En 2019, un projet de chercheurs en psychologie des universités Louis-et-Maximilien de Munich (Allemagne) et Radboud (Pays-Bas) révélait que des humains pouvaient éprouver de l'empathie pour des robots, au point d'hésiter à les sacrifier dans une situation critique, que les machines soient anthropomorphiques ou non. La variable clef réside plutôt dans la description des affects, de l'état d'esprit et des ressentis des robots.

Au Massachusetts Institute of Technology (Cambridge, États-Unis), des chercheurs du Media Lab ont étudié les comportements de 34 groupes familiaux face à cinq assistants vocaux (Jibo, Google Home, Amazon Echo, Amazon Echo Show pre-

AMAZON - JIBO - AMAZON - GOOGLE

Certains assistants vocaux vont au-delà d'une réponse à une commande, en s'animant par exemple. Les utilisateurs leur prêtent dans ce cas davantage une personnalité (de gauche à droite, Amazon Echo Show, Jibo, Amazon Echo Spot, Google Home).


CREATIVE MACHINES LAB / COLUMBIA ENGINEERING

Eva, conçue par des chercheurs de l'université Columbia (États-Unis), est capable de reproduire les mouvements de plus de 42 muscles faciaux humains.

PERCEPTION

Dans les méandres de la « vallée de l'étrange »

C'est en 1970 qu'apparaît, dans la revue *Energy*, la formule « vallée de l'étrange ». Due au roboticien japonais Masahiro Mori, elle désigne un phénomène paradoxal : plus un robot à une apparence humaine, plus il crée un malaise chez les humains. En 2020, deux chercheurs de l'université Emory, à Atlanta (États-Unis), ont établi que la gêne n'est pas immédiate. Les androïdes sont d'emblée jugés « humains ». Mais ce sentiment décroît avec le temps (entre 100 et 500 millisecondes) pour les robots les plus humanoïdes. C'est ce changement de perception en cours d'observation qui contribue au malaise. En 2018, une équipe en sciences cognitives de l'université de Californie à Berkeley (États-Unis) a utilisé des vidéos de robots mécaniques, d'humanoïdes et d'humains se livrant à des tâches manuelles. Les chercheurs ont capté des ondes cérébrales particulières, dites N400, qui correspondent à une réponse négative à un stimulus. Lorsque seul un bref extrait était proposé, les scènes montrant des humanoïdes ne provoquaient rien de notable. En revanche, chez les participants auxquels on projetait les vidéos en continu, un pic de N400 finissait par être constaté. Le fait de laisser filer la vidéo installe en effet chez l'observateur une attente quant aux gestes du robot — il anticipe des gestes « biologiques », cohérents avec l'apparence humaine. Or, ce n'est pas le cas. D'où une discordance génératrice de malaise.

SYLVIE BORAU

« Faire davantage confiance à des machines parce qu'elles sont féminines, c'est aussi leur laisser la possibilité de nous influencer »

Sylvie Borau, spécialiste en psychologie de la consommation, professeure associée à la Toulouse Business School

mière version et un Amazon Echo Spot modifié). Il en ressort que plus ces derniers ont des réactions allant au-delà de la simple réponse à une commande — en s'animant, comme le Jibo ou l'Echo Spot —, plus les participants leur prêtent une personnalité, interagissent comme avec un humain et leur attribuent de la compétence. Spécialisée en psychologie de la consommation à la Toulouse Business School, Sylvie Borau a montré que si les assistants vocaux sont pour la plupart féminisés, ce n'est pas par hasard *(lire l'encadré p. 55)*. Les utilisateurs et utilisatrices trouvent plus chaleureuses et plus dignes de confiance ces interfaces. *« On ne s'y attendait pas,* avoue-t-elle, *avant d'ajouter : cela augmente aussi la compétence perçue du chatbot.* » D'autant plus que ces constats ont été faits sans même exposer réellement les participants à un assistant, mais juste en leur décrivant une interface dont le genre n'était pas explicite, mais déductible de son nom (Olivier, Olivia). *« Or, faire davantage confiance à des machines parce qu'elles sont féminines, c'est aussi leur laisser la possibilité de nous influencer,* prévient Sylvie Borau. *N'oublions pas que derrière ces interfaces, il y a des entreprises.* » Lesquelles peuvent très bien mettre en avant, sous couvert d'assistance, leurs produits et services. C'est peut-être là que résidera la vie en bonne intelligence avec les machines : savoir pourquoi elles sont là, qui les conçoit et dans quels buts. Voir au-delà de leur apparence en somme. Comme avec les humains. ■ **Arnaud Devillard** @A_Devila

POUR EN SAVOIR PLUS

- L'Unesco contre les biais de genre dans l'intelligence artificielle : **sciav.fr/902genre**
- Une recherche de l'université de Géorgie sur la confiance exagérée dans les algorithmes : **sciav.fr/902algo**
- Le robot Ameca : **sciav.fr/902ameca**
- Écoutez Q, l'interface vocale au genre neutre : **www.genderlessvoice.com**

LES INDISPENSABLES

LES INDISPENSABLES
SCIENCES ET AVENIR

EXCLUSIF

Les Contes du Canterbury,
une nouvelle inédite de
Hervé Le Tellier
Prix Goncourt 2020 pour *L'Anomalie*

LA FACE CACHÉE DE L'UNIVERS

Voyage au cœur d'un trou noir
Europe, Titan, Encelade... des océans sous la glace
Insaisissable matière noire
Le James-Webb à l'assaut des premières étoiles

PATRICE NORMAND/LEXTRA/OPALE, GETTY IMAGES

L 13667 - 209 H - F: 5,90 € - RD

NUMÉRO SPÉCIAL 209 AVRIL/JUIN 2022 - ALLEMAGNE 8.00 €/ BELGIQUE : 6.10€/ GRÈCE : 6.20€/ ESPAGNE : 6.20 €/ ITALIE : 6.20 €/ DOM: 6.20€/ LUXEMBOURG : 6.10 €/ PORTUGAL CONT : 6.20 €/ TOM S : 860 XPF/ TOM AVION : 1600 XPF/ SUISSE : 9.80 CHF/ TUNISIE : 10 TND/ MAROC : 60 MAD/ CANADA : 9.49 $CAD

en vente en kiosque

LYDIE LECARPENTIER/REA

Stockage du CO_2, recyclage des matériaux, utilisation de produits biosourcés ou de combustibles végétaux… Les solutions alternatives développées par l'industrie pour réduire son empreinte énergétique seront-elles suffisantes pour atteindre la neutralité carbone en 2050 ?

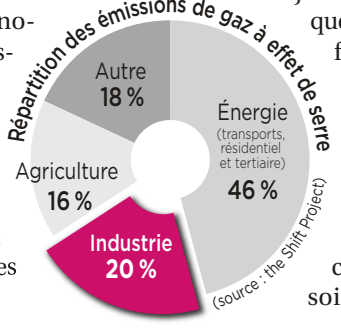
Décarboner l'industrie

Ces innovations qui rendent le pari possible

Les secteurs de la chimie, de la sidérurgie, du ciment ou encore des engrais et des pneumatiques sont condamnés à évoluer pour respecter les engagements français sur les émissions de gaz à effet de serre. Enquête sur les innovations technologiques déployées par chaque filière.

Par Loïc Chauveau @Loic_Chauveau

Comment fondre de l'acier, broyer du ciment, synthétiser des produits chimiques sans pétrole, ni charbon, ni gaz ? C'est le problème auquel doit faire face l'industrie lourde. La France s'est en effet engagée à atteindre la neutralité carbone en 2050. Toutes les composantes de l'économie doivent y contribuer et l'industrie a une responsabilité particulière. L'acier, le ciment et la chimie constituent les bases de tous les produits de consommation courante, de la voiture au détergent ménager en passant par les bâtiments. Ils devront aussi constituer les premières briques d'une société bas carbone.



INFOGRAPHIES : BRUNO BOURGEOIS

La France vient de traverser plus de trois décennies de désindustrialisation, si bien que la contribution de l'industrie au PIB n'est plus que de 10 %. Mais la part de responsabilité de celle-ci dans les émissions de gaz à effet de serre est deux fois supérieure, parce que ces usines restent très énergivores. 75 % des rejets atmosphériques sont concentrés sur quelques dizaines de sites : deux hauts-fourneaux sidérurgiques, 12 plates-formes chimiques, 20 cimenteries. Les objectifs sont extrêmement élevés. Les plus grosses entreprises ont diminué leurs émissions de 40 % entre 1990 et 2020. Elles devront encore les faire baisser de 80 % au cours des trente prochaines années, soit un rythme de réduction de 5 % ▶

an. « *Cela n'a jamais été fait* », souligne Éric Bergé, chef de projet industrie lourde au groupe de réflexion The Shift Project, qui vient de publier un plan intitulé « Décarboner l'industrie sans la saborder ».
« *L'amélioration des procédés actuels ne permet pas d'atteindre l'objectif, et si on doit continuer à placer de l'espoir sur les technologies de rupture, cela reste un pari,* table Éric Bergé. *Aussi il faudra bien en passer par une adaptation de la production sur l'évolution des usages finaux et donc sur une réduction volontaire des besoins.* » Exemple : en 2050, la production automobile devra avoisiner les 1,6 million de véhicules contre 2 millions aujourd'hui. À l'arrivée, selon The Shift Project, 20 % de la réduction des émissions seront obtenus par la sobriété, 40 % par l'optimisation des technologies existantes et 40 % par des ruptures technologiques. Le plan de relance post-Covid va ainsi consacrer 5,6 milliards d'euros à la transformation des procédés industriels complexes reposant sur les énergies fossiles.
Si cela ne suffit pas, reste la carte de la dernière chance : la capture et séquestration du carbone (CSC). Elle consiste à extraire, grâce à des solvants, le dioxyde de carbone (CO_2) des fumées à la sortie des cheminées pour l'enfouir dans des couches géologiques profondes. Retenue comme une solution pertinente dans les derniers rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), la CSC prend aujourd'hui une place importante dans les stratégies des cimentiers, sidérurgistes et chimistes.
« *On pourrait dans un premier temps trouver une utilisation à ce CO_2 dont 150 000 tonnes sont employées en chimie tous les ans en France,* propose Vincent Pegeot, du Syndicat français de l'industrie cimentière (SFIC). *Ainsi, ce gaz pourrait fertiliser les futurs bassins de culture de microalgues pour faire des biocarburants.* » Mais aujourd'hui, seul l'enfouissement a un coût supportable. Voici les pistes et les innovations, secteur par secteur. ■

SEBASTIAN KAHNERT / DPA / AFP

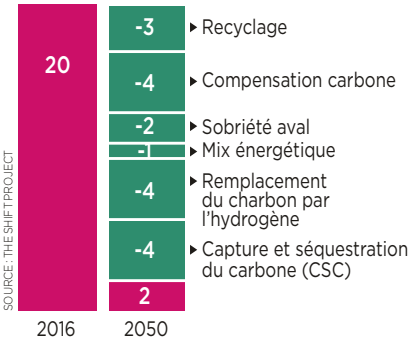
L'utilisation du four à arc électrique pour fondre l'acier (ici dans une usine à Peine, en Allemagne) permet à la fois de réduire les émissions carbone et de recycler la ferraille.

SIDÉRURGIE

Le salut par l'hydrogène et le stockage du CO_2

Fabriquer de l'acier consiste à mélanger dans des hauts-fourneaux de gros blocs de minerai de fer à du coke de pétrole. À haute température, le coke procède en même temps à la désoxydation du minerai (on en enlève l'oxygène) et à sa fonte. Pour diminuer les émissions de CO_2 qui découlent de ces deux opérations, deux voies sont possibles : remplacer le charbon soit par de l'hydrogène, soit par de l'électricité. « *L'utilisation de l'hydrogène oblige à changer complètement les fours car les deux opérations de désoxydation et de fonte*

Leviers de réduction des émissions de CO_2 (en $MteqCO_2$)
Les émissions passeraient de 20 millions de tonnes équivalent CO_2 en 2016 à 2 millions en 2050.



ne peuvent plus s'opérer simultanément », explique-t-on à ArcelorMittal, le groupe sidérurgique l propriétaire des deux derniers hauts-fourneaux français, à Dunkerque (Nord) et Fos-sur-Mer (Bouches-du-Rhône). Les fours à arc fonctionnent, eux, avec des électrodes permettant d'obtenir une température suffisante pour la fusion de l'acier. Avantage de cette technique : elle permet de recycler la ferraille provenant de la déconstruction de bâtiments ou de camions, wagons, voitures en fin de vie. *« Vers 2030, ce recyclage représentera 25 % de la production d'acier en France »* affirme-t-on chez Arcelor. À la fin de la décennie, annonce le sidérurgiste,

> 25 % de la production d'acier proviendront du recyclage de la ferraille en 2030

trois de ses cinq fours actuels utiliseront des solutions alternatives. Dès 2027, les émissions de CO_2 de Fos-sur-Mer et de Dunkerque devraient diminuer de 7,8 millions de tonnes par an, soit 10 % des émissions totales du secteur industriel français.

Dans une deuxième phase, ArcelorMittal va exploiter la voie de la capture et du stockage du CO_2 (CSC). Le 5 janvier, les premiers modules d'un démonstrateur ont été montés sur le site de l'usine de Dunkerque. Cette tour de 22 mètres de haut va capter le CO_2 grâce à un solvant injecté dans les fumées qui isole ce gaz. Cette première unité sera capable de détourner 4400 tonnes de CO_2 par an. Dunkerque a l'avantage d'être au bord de la mer. Un terminal est d'ores et déjà prévu pour que le CO_2 soit acheminé par bateau vers les gisements épuisés de pétrole et de gaz en mer du Nord afin d'y être enfoui. ■

CHIMIE

Priorité au recyclage et aux produits biosourcés

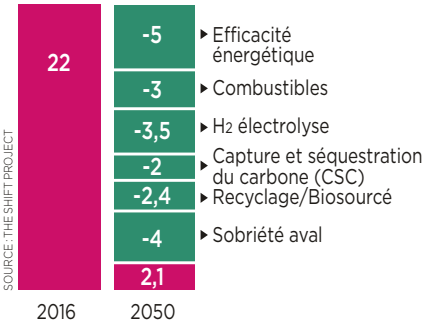
Baisser d'un quart les émissions d'ici à 2030, c'est l'objectif à court terme du secteur de la chimie. Pour y parvenir, il faudra diminuer la quantité d'énergie nécessaire pour élaborer les produits de base, imposer le recyclage et remplacer le pétrole par des produits biosourcés issus de plantes. Selon sa feuille de route publiée en mai 2021, la filière peut d'ores et déjà compter sur des procédés moins gourmands et remplacer le pétrole par de la biomasse et des déchets combustibles. Elle doit aussi partir à la chasse aux fuites de protoxydes d'azote (N_20) et de HFC, un frigorigène bientôt interdit. Au-delà, deux pistes permettent de s'attaquer à la nature pétrolière de la chimie : le recyclage et le biosourcé.

Le recyclage concerne principalement les emballages. Dans un premier temps, le procédé est resté mécanique. Les emballages et bouteilles usagées étaient broyés, fondus et refroidis en granulés pour d'autres usages, comme les piquets de vigne ou le mobilier urbain. Émerge aujourd'hui le recyclage chimique du PET (polytéréphtalate d'éthylène) et dans une moindre mesure du PEHD (polyéthylène haute densité) où le monomère d'origine est reconstitué à partir du plastique usagé. La pépite du secteur est française, Carbios, issue de travaux menés conjointement par le CNRS, l'Inrae et l'université de Poitiers. Son procédé utilise des enzymes capables de découper les polymères pour reconstituer le monomère d'origine et ainsi refaire à l'infini du PET apte à l'usage alimentaire. La plupart des industriels visent les 100 % recyclables pour 2025.

> Remplacer le pétrole par des substances issues de végétaux permet une décarbonation totale

Le biosourcé, quant à lui, consiste à remplacer le pétrole par des substances issues de végétaux, ce qui permet une décarbonation totale. Ainsi, le projet français Respire a permis de mettre au point une colle à base de tourteau de colza, utilisable pour la fabrication de panneaux de bois agglomeré. La start-up Lactips utilise, elle, une protéine du lait pour fabriquer des films hydrosolubles entourant les tablettes des lessives de machine à laver la vaisselle. ■

Leviers de réduction des émissions de CO_2 (en MteqCO_2)
Seuls 2,1 millions de tonnes équivalent CO_2 seraient émis en 2050, contre 22 millions en 2016.



CIMENT

Miser sur des combustibles de substitution

SERAMCO

Le traitement thermique (à 1450 °C) pour produire le ciment est très gourmand en CO_2.

Le ciment est une poudre issue du traitement thermique d'un mélange de craie et d'argile, le « kaolin ». Cette matière première est introduite dans des fours rotatifs à 1 450 °C pour en ôter le carbone qui le compose. Cette opération est très émettrice, à la fois du fait de la chaleur nécessaire et des rejets de CO_2. Les cimentiers ont donc deux solutions : agir sur leur consommation d'énergie et réduire les besoins en kaolin en le remplaçant par d'autres matériaux. Car il existe des substituts à cette matière première qu'il faut beaucoup moins chauffer, voire pas du tout. *« Les laitiers (résidus des fours de sidérurgie), les cendres volantes des centrales thermiques au charbon et surtout les mélanges d'argiles calcinées et calcaire, peuvent remplacer le kaolin »*, énumère Laurent Izoret, délégué produit applications et recherches au Syndicat français de l'industrie cimentière (Sfic). Les cimentiers envisagent même d'utiliser la silice en poudre issue du recyclage du verre, un matériau qui devient abondant. La nouvelle norme de qualité du ciment publiée le 1er octobre 2021 garantit une baisse de 35 % des émissions. Face à l'arrivée du bois dans la construction, la question est vitale pour le secteur. *« Pour réussir notre décarbonation à l'horizon 2050, nous avons aussi les*

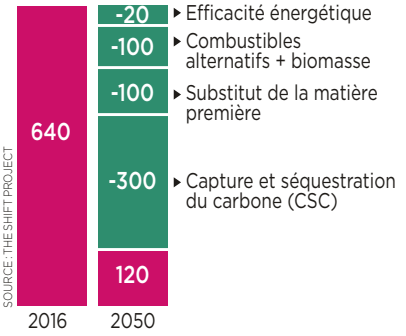
ENGRAIS

Rendre l'ammoniac propre

La fabrication de l'engrais est un gouffre à émissions de gaz à effet de serre. Le bilan total de production de l'ammoniac peut atteindre 3,6 kg de CO_2 par kilogramme d'engrais produit. Dans son scénario de décarbonation de l'économie, The Shift Project pointe cette activité comme l'une des plus pénalisantes pour le climat. Selon le procédé Haber-Bosch communément utilisé, il faut d'abord produire de l'hydrogène à partir de gaz naturel pour le combiner ensuite avec l'azote de l'air sous des conditions de chaleur et de pression très énergivores. Le principal levier consiste donc à utiliser de l'hydrogène produit à partir d'énergies renouvelables. Mais la réaction pourrait se faire à température ambiante, ouvrant la possibilité aux agriculteurs de fabriquer eux-mêmes leurs engrais. C'est en

Des sels de phosphonium se sont avérés aptes à produire de l'ammoniac sans hydrogène, à température ambiante et avec un bon rendement

Leviers de réduction des émissions de CO_2 (en $kgCO_2$/tonne de ciment)
De 640 kg de CO_2 par tonne de ciment en 2016, les émissions chuteraient à 120 kg en 2050.



SOURCE: THE SHIFT PROJECT

combustibles alternatifs remplaçant le charbon qu'on utilisait traditionnellement » détaille Vincent Pégeot, directeur délégué environnement au Sfic. Depuis les années 1980, les cimentiers brûlent ainsi des déchets non recyclables tels que les huiles et solvants usagés, des farines animales, des déchets de bois et de chiffons appelés « combustibles solides de récupération » (CSR)… avec la même efficacité. Et les résultats sont là : une tonne de ciment émet aujourd'hui 629 kg de CO_2, soit deux fois moins qu'il y a quarante ans. ■

tout cas la promesse de chercheurs de l'université Monash, en Australie. Les scientifiques décrivent le processus comme *« très similaire à celui s'opérant dans un électrolyseur à eau pour produire de l'hydrogène »*, à la différence des électrolytes (minéraux qui transportent une charge électrique lorsqu'ils sont dissous dans un liquide). Des sels de phosphonium se sont ainsi avérés aptes à produire de l'ammoniac sans hydrogène, à température ambiante et avec un bon rendement. Le procédé efficace et productif devrait fortement réduire les émissions. Mais il doit encore faire la preuve d'un développement à grande échelle. ■

STEPHANE AUDRAS/REA

Le broyat de pneu usagé peut servir à la fabrication de nouveaux pneus.

PNEUMATIQUE

Faire du pneu une ressource durable

Une partie de la réduction des émissions du secteur des transports tient dans les roues des véhicules. *« Un plein d'essence sur cinq est dépensé pour contrer la résistance au roulement du pneumatique, un élément qui compte aussi pour l'autonomie des voitures électriques »*, révèle Cyrille Roget, expert innovation chez Michelin. Depuis l'invention du pneu radial dans les années 1940 — qui a doublé la durée de vie d'un pneumatique —, la stratégie des constructeurs est de réduire cette consommation en travaillant sur l'architecture des pneus, la gomme de la bande de roulement, les dessins des sculptures avec le développement de nouveaux élastomères. *« 90 % de l'impact environnemental d'un pneu a lieu lors de son usage »*, rappelle Cyrille Roget.

La silice utilisée pour accroître la résistance du pneu pourrait bientôt provenir d'écorces de riz

Ce qui n'exclut pas de chercher des solutions de diminution de gaz à effet de serre dans le procédé de fabrication. Michelin ambitionne de remplacer l'ensemble des produits issus du pétrole par des matériaux durables. C'est en cours pour les grillages métalliques de renforcement des pneus qui devront être issus d'acier recyclé, moins émissif, de même que la silice utilisée pour accroître la résistance qui pourrait bientôt provenir d'écorces de riz. En janvier, le consortium européen Black Cycle a annoncé avoir trouvé le moyen de refaire du noir de carbone — élément essentiel de résistance des pneus — à partir de pneus usagés. La technique consiste à traiter par pyrolyse des broyats de pneus pour en extraire les huiles aptes à rentrer de nouveau dans le procédé de fabrication. *« D'ici à 2030, 13,5 millions de tonnes de matériaux durables seront intégrées dans nos produits »*, prévoit Cyrille Roget. ■

Les vers plats, nouveaux envahisseurs de nos jardins

En provenance d'Asie, d'Amérique du Sud ou d'Australie, ces espèces exotiques colonisent de plus en plus le sol français et européen. Deux d'entre elles viennent ainsi pour la première fois d'être repérées dans le Sud-Ouest et à Mayotte. Une menace pour l'équilibre écologique.

Un aspect gluant peu ragoûtant, une tête plate en forme de faucille sans bouche ni yeux visibles, un corps allongé et sinueux aux couleurs toxiques ? Pas de doute : il s'agit d'un plathelminthe ou ver plat. Deux nouvelles espèces viennent d'être décrites par Jean-Lou Justine et son équipe du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, et font l'objet d'une publication dans la revue *PeerJ*. Elles s'ajoutent à la liste déjà conséquente de ces envahisseurs venus d'ailleurs — Asie mais aussi Amérique du Sud ou Australie. Depuis une décennie, ils prennent en Europe et dans d'autres régions du monde une place de plus en plus considérable dans l'environnement, se nourrissant de leurs hôtes comme les escargots et vers de terre, dégradant par là même fortement l'équilibre du biotope local. *Sciences et Avenir* avait déjà rendu compte de ce phénomène inquiétant en 2018*. Mais, depuis, la situation s'est dégradée et la menace est aujourd'hui mondiale *(lire l'encadré)*.

Une analyse des gènes mitochondriaux

Pour le dernier envahisseur en date retrouvé dans l'Hexagone et nommé *Humbertium covidum* (en hommage aux victimes du Covid-19), tout est parti d'une photo envoyée par un amateur. *« Il n'est pas fréquent de trouver une nouvelle espèce sur notre territoire »*, reconnaît Jean-Lou Justine. Surtout que la trouvaille avait tout pour passer inaperçue, notamment par sa taille. Alors que les *« vers plats à tête en forme de marteau »* font en moyenne 20 centimètres de long, *Humbertium covidum* ne dépasse pas la trentaine de millimètres ! *« Sur la première photo que j'ai reçue de l'espèce, j'ai cru avoir affaire à des bébés. Mais, non, c'étaient des adultes… »*, poursuit le spécialiste.

MODÉLISATION

Le réchauffement, facteur aggravant

Si la mondialisation est propice à une dissémination des vers plats, le réchauffement planétaire en cours représente un autre facteur aggravant. *« On commence à en retrouver un peu partout ! »* s'alarme Yoan Fourcade (université Paris-Est Créteil, IEES Paris) dans un article de *Diversity and Distributions* du 22 février. Afin d'estimer l'ampleur de la menace dans un contexte climatique changeant, le chercheur vient de modéliser les risques d'invasion à l'échelle du globe. Et si ces animaux n'ont pas encore colonisé l'ensemble des régions à risque, la situation pourrait drastiquement s'aggraver. *« Les deux espèces les plus fréquemment introduites, à savoir* Bipalium kewense *et* Bipalium vagum*, sont également celles qui pourraient tirer avantage d'un climat plus chaud »*, analyse-t-il. Par la suite, Yoan Fourcade espère pouvoir suivre des espèces durant plusieurs années afin d'estimer leurs propagations et évaluer l'impact de ces animaux carnivores sur les populations de vers de terre et d'escargots. Mais, il en est persuadé : l'invasion ne fait que commencer…

P. GROS - 2019

Cet « Humbertium covidum » de 25 mm de long a été découvert à Billère (Pyrénées-Atlantiques).

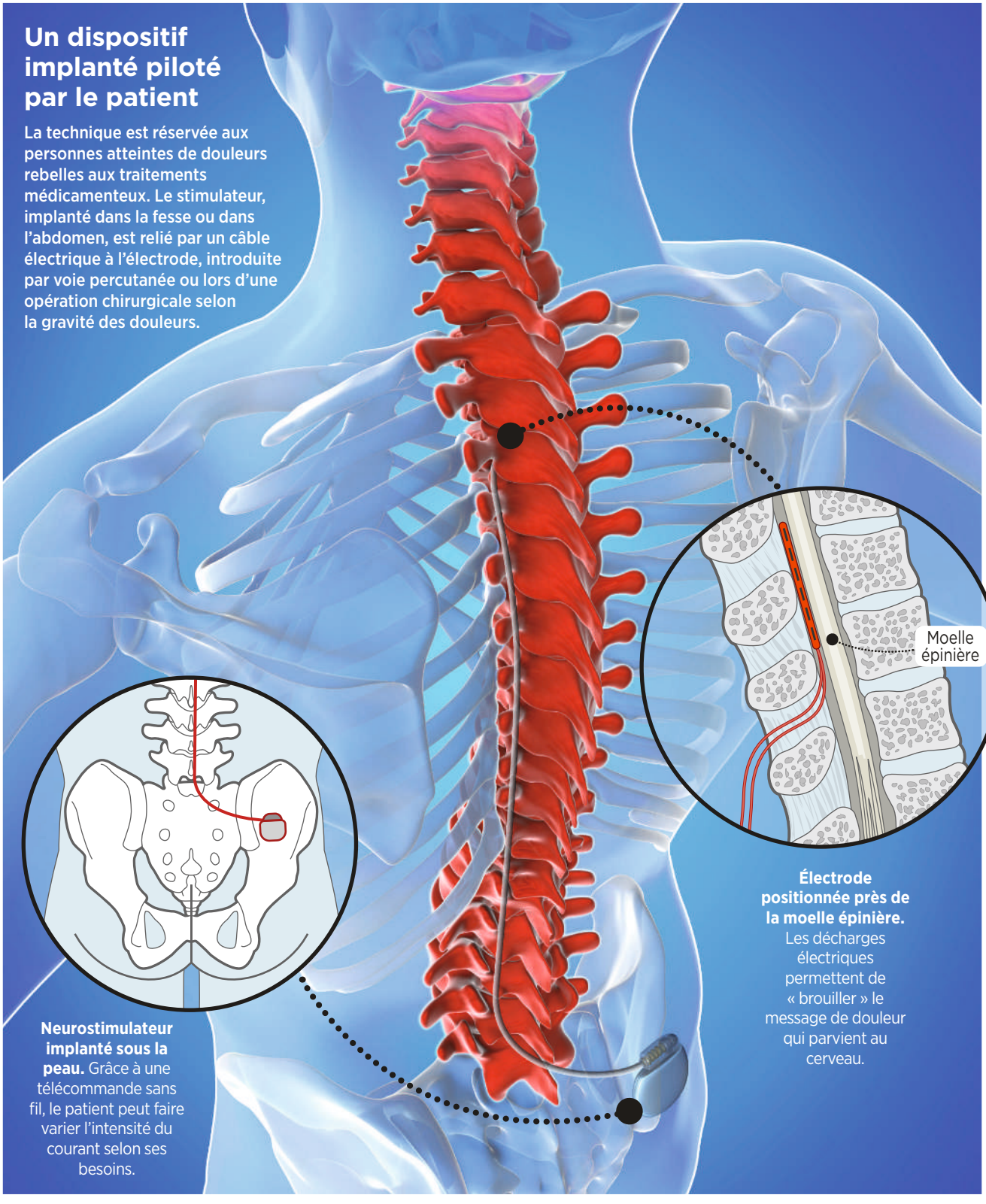
De surcroît, ce mini-ver plat est noir comme le jais, ce qui le rend d'autant plus difficilement décelable. Depuis que l'alerte a été lancée, l'animal a été repéré dans le département des Pyrénées-Atlantiques, ainsi qu'en Italie. *« Il semble encore peu présent en France, contrairement à l'Italie où plusieurs centaines d'individus ont été retrouvées dans un seul jardin ! »* Afin de mieux le caractériser, l'animal a été scruté morphologiquement et génétiquement. Les chercheurs se sont notamment concentrés sur l'analyse de ses gènes mitochondriaux. Ce qui a permis de rapprocher le nouveau venu du genre *Humbertium* et d'estimer la différence phylogénétique existant entre la variété française et italienne : environ 2 %.

Quant à la seconde nouvelle espèce, elle a été dénichée à Mayotte. *« Également de petite taille,* Diversibipalium mayottensis *est vert-bleu mordoré,* décrit Jean-Lou Justine. *C'est la première fois qu'on trouve des vers plats de cette coloration. Mais cette espèce, à la différence de celles retrouvées en France métropolitaine, pose un problème bien particulier. »* En effet, même s'il est évident que l'espèce n'a pas évolué sur l'île, les scientifiques se creusent la tête pour savoir quand l'animal y aurait débarqué. *« Si ce petit ver plat est arrivé voilà une vingtaine d'années, on peut donc le classer parmi les espèces exotiques envahissantes. Mais s'il est présent sur l'île depuis beaucoup plus longtemps — par exemple un millier d'années —, cela en fait au contraire une espèce à protéger et non à éradiquer… »*, explique-t-il. Pour avoir la réponse à cette énigme, il serait nécessaire de disposer de signalements supplémentaires. Or, pour le moment, ce ver plat singulier n'a été trouvé que par une seule personne sur Mayotte, l'espèce n'ayant été repérée nulle part ailleurs que sur cet archipel de l'océan Indien. Devant la menace écologique posée par ces vers plats venus d'ailleurs, l'Europe devrait se saisir de la question dans quelques mois. Et Jean-Lou Justine met la dernière main à un rapport pour l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) afin de proposer des solutions de lutte. À l'échelle individuelle, il est possible de consulter la page du chercheur *(voir ci-contre)* pour savoir quoi faire si l'un d'eux apparaît dans votre jardin. *« Quoi qu'il en soit, une fois que l'invasion a commencé, il n'y a plus grand-chose à faire,* conclut l'expert. *La seule action à mener se situe essentiellement au niveau de la prévention, par exemple en évitant d'importer des plantes venues d'Asie, car la terre des pots recèle quantité de ces envahisseurs. »* ■ **Hervé Ratel**

POUR EN SAVOIR PLUS

- La page de Jean-Lou Justine pour signaler un ver plat : **sciav.fr/902ver***
- Notre article sur le ver plat argentin en Europe : **sciav.fr/902argentin**

* sciav.fr/902verplat



BRUNOBOURGEOIS

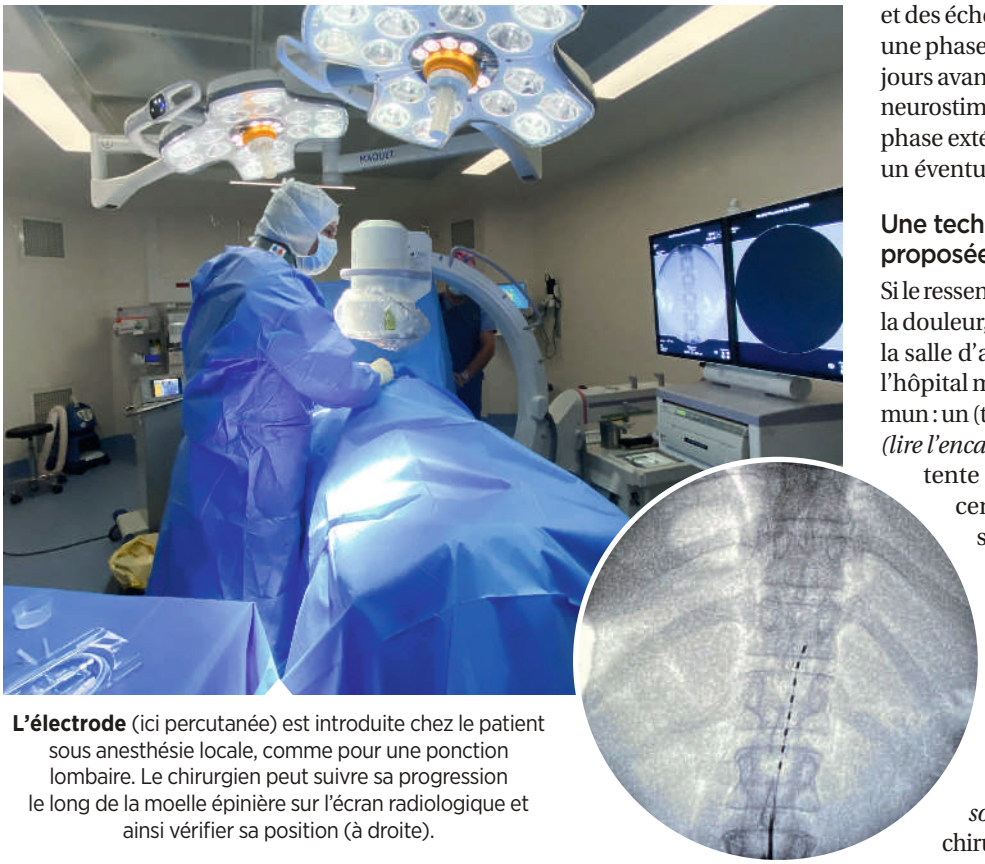
Douleur
La neurostimulation sur mesure

Implanté sous la peau, un boîtier relié à des électrodes permet de soulager des douleurs neuropathiques chroniques grâce à une stimulation électrique du système nerveux. Reportage à Marseille dans l'une des rares structures spécialisées en France dans cette technique.

Par Sylvie Riou-Milliot

Un matin d'hiver, à la consultation douleur du Dr Marc Lévêque à l'hôpital Clairval sur les hauteurs de Marseille, à quelques kilomètres des calanques. Dehors, un froid soleil et de violentes rafales de mistral. Dans le couloir, deux patients discutent debout. Si Philippe est un habitué des lieux (*lire l'encadré p. 69)*, pour monsieur F., c'est une première. D'ailleurs, il s'est trompé d'étage et est attendu ailleurs. Avant de se rendre au bon endroit, il plaque ses deux paumes de main sur le bas de son dos pour bien montrer à Philippe la localisation de ses douleurs et lui demande : *« Mais ils la mettent où exactement, la boîte ?* » La boîte, c'est le neurostimulateur implanté sous la peau, dans l'abdomen ou dans le bas du dos, celui que portent la plupart des patients déjà présents dans la salle d'attente. Relié à des électrodes positionnées près de la moelle épinière en fonction des zones de douleur de chaque patient *(voir l'infographie ci-contre)*, il permet de traiter sur mesure des états douloureux complexes.

Mise au point dans les années 1970 aux États-Unis, la technique a été depuis affinée grâce à la miniaturisation et à de récents progrès technologiques (boîtiers rechargeables, compatibilité IRM…). Son principe : stimuler de manière permanente la moelle épinière par un courant électrique allant du boîtier vers l'électrode afin de « brouiller » le message de douleur qui parvient au cerveau. Tout repose sur la théorie dite du portillon (*gate control* en anglais). Pour bien comprendre, rappelons qu'il existe deux types de sensibilité : une pour le toucher, dite proprioceptive, l'autre pour la perception de la chaleur et de la douleur, les deux étant véhiculées par différentes fibres nerveuses. Mais, au niveau de leur entrée dans la moelle épinière, le « portillon » privilégie toujours le passage des premières sur celui



MARC LÉVÊQUE

L'électrode (ici percutanée) est introduite chez le patient sous anesthésie locale, comme pour une ponction lombaire. Le chirurgien peut suivre sa progression le long de la moelle épinière sur l'écran radiologique et ainsi vérifier sa position (à droite).

des secondes. Un concept que Fleur, l'infirmière ressource douleur, a traduit en images pour les patients qu'elle voit systématiquement avant leur consultation avec le neurochirurgien : *« Si un TGV croise un TER, c'est toujours priorité au TGV. C'est pourquoi, quand nous recevons un coup sur une partie du corps, nous avons le réflexe de frotter la zone endolorie,* précise-t-elle. *Cela crée de nombreux influx proprioceptifs qui viennent encombrer le portillon et prennent le pas sur les messages douloureux.* » Tel est le principe de la neurostimulation : envoyer des fourmillements en continu pour diminuer la perception de la douleur. On n'en supprime pas la cause mais on en modifie le ressenti.

Près de 20 000 personnes aujourd'hui en France vivent avec un neurostimulateur et environ 2500 nouveaux patients sont équipés chaque année. Ils sont tous atteints de douleurs neuropathiques — des « décharges électriques » très pénibles à supporter et difficiles à prendre en charge avec les techniques habituelles —, consécutives à la lésion d'un nerf après une chirurgie, un diabète, un zona, ou un traumatisme. Remboursée depuis plusieurs années pour les patients souffrant depuis plus d'un an, la technique est pratiquée dans quelques rares centres en France, comme ici à Marseille*. Elle est efficace dans plus de 70 % des cas, avec une diminution d'environ 50 % de l'intensité des douleurs. Mais elle présente aussi des risques (infectieux ou hémorragiques, chez moins de 5 % des opérés) et des échecs (dans 15 % des cas). D'où une phase de test systématique de huit jours avant l'implantation définitive, le neurostimulateur restant pendant cette phase extérieur au corps, pour faciliter un éventuel retrait.

POUR EN SAVOIR PLUS

- Les structures spécialisées contre la douleur : **sciav.fr/902centresdouleur**
- La chirurgie de la douleur : **sciav.fr/902chirurgie**

Une technique hélas trop souvent proposée comme dernier recours

Si le ressenti de chacun est unique face à la douleur, tous les patients réunis dans la salle d'attente de la consultation de l'hôpital marseillais ont un point commun : un (très) lourd passé de souffrance *(lire l'encadré ci-contre)*, les délais d'attente de prise en charge dans les centres antidouleur dépassant souvent six mois. *« La neurostimulation est souvent proposée trop tardivement car elle est encore considérée comme une solution de dernier recours, après cinq ans de douleurs en moyenne et la prise de nombreux médicaments aux effets souvent délétères »*, déplore le chirurgien. Une étude canadienne a pourtant démontré que plus on attend, moins le résultat est bon, le pourcentage d'efficacité passant de 93 %, si l'intervention est réalisée dans les trois premières années, à 50 % après six ans. Monsieur F. sera peut-être finalement un jour équipé de l'un des nombreux modèles disponibles (Medtronic, Boston Scientific, Saint Jude Hospital…). Il devra alors apprendre à vivre avec sa « boîte ». Il lui faudra surtout se familiariser avec une télécommande pour adapter les réglages en fonction de ses activités, en augmentant ou diminuant l'intensité de la stimulation, chaque patient affinant celle-ci selon son ressenti à chaque instant. Pour le moment, rien n'est encore décidé dans le cas de monsieur F., qui est là pour son bilan préimplantatoire, qui comporte des rendez-vous avec différents spécialistes (neurologue, psychiatre), lesquels confronteront ensuite ensemble leurs impressions avant de décider ou non de la pose. Un temps

TÉMOIGNAGES

Une qualité de vie retrouvée pour ces patients implantés

PHILIPPE, 60 ANS
« Je marche, je jardine, je revis… »

P.P.

« J'ai commencé à avoir mal au dos vers l'âge de 25 ans, après un accident de voiture. À 50 ans, en 2012, j'ai finalement été opéré du dos. Mais les vis se sont cassées et pendant sept ans, les douleurs sont devenues quotidiennes et très invalidantes. Morphine, béquilles, corset… sans résultat. Dans un centre de rééducation, j'ai rencontré un patient qui m'a parlé de cette méthode. Je me suis renseigné, j'ai consulté et mon stimulateur a été posé en 2019. Depuis, je m'autogère et cela a tout changé pour moi. Aujourd'hui, je marche, je jardine, je revis. »

MARTINE, 64 ANS
« Des douleurs réduites de 70 % »

M.N.

« J'ai été implantée en novembre 2021 car je souffrais depuis 2014, à la suite d'une intervention chirurgicale pour soigner une hernie discale, au cours de laquelle le chirurgien a sectionné un nerf. Je me suis retrouvée paralysée jusqu'au genou avec des douleurs dans un pied. J'ai tout essayé, les morphiniques, les anti-épileptiques, la kétamine… Rien ne me calmait. Aujourd'hui, les douleurs n'ont pas entièrement disparu mais sont réduites d'environ 70 %. Et puis, surtout, je dors, enfin. »

PATRICK, 50 ANS
« Cela a tout changé : je peux enfin bouger »

P.C.

« J'ai subi sept interventions sur le dos en dix ans depuis 2008 en raison de cassures répétées des vis orthopédiques. Résultat : des douleurs permanentes, une hépatite médicamenteuse en raison des nombreux médicaments que je prenais… Un vrai cauchemar. J'essayais de vivre avec mes douleurs mais ne vivais plus vraiment. Ma vie professionnelle, familiale, personnelle était impactée. J'ai finalement été implanté en 2018 avec plusieurs électrodes et cela a tout changé. Pas de manière miraculeuse, mais les douleurs ayant diminué de 80 %, je peux enfin bouger. »

toujours nécessaire pour éliminer les contre-indications (troubles de la coagulation, infection, troubles cognitifs, psychiatriques). « *Certains patients ont des attentes démesurées, d'autres ne peuvent s'approprier le bon maniement de l'appareil* », résume Fleur.

Des réglages peaufinés durant une huitaine de jours

Pour Sandrine, 49 ans, souffrant depuis plusieurs années de douleurs intenses au niveau de la jambe et du dos, toutes ces étapes ont déjà été franchies. Aujourd'hui, elle est au bloc opératoire, allongée sur le ventre, et va être implantée avec une électrode dite percutanée. Comme lors d'une ponction lombaire, le chirurgien pique dans le bas du dos, vers la cinquième vertèbre lombaire, là où la moelle épinière n'est plus présente. Puis, sans quitter des yeux l'écran de radiologie installé devant lui, il contrôle la remontée progressive vers les vertèbres dorsales de son fil comportant plusieurs petits plots métalliques à son extrémité. Ce sont eux qui enverront le courant quand le dispositif sera branché. À proximité de la zone d'où part le signal responsable des douleurs présentes chez Sandrine, entre la huitième et la dixième vertèbre dorsale, le chirurgien s'arrête. Grâce au cocktail anesthésique très précis qui lui a été administré, il est maintenant possible de la réveiller et de converser avec elle. Un temps essentiel qui assure le chirurgien du bon positionnement de l'électrode. « *Sandrine, vous êtes avec nous ? Que sentez-vous ? Nous allons vous stimuler, à vous de nous dire si ce que vous allez ressentir recouvre bien la zone de vos douleurs.* » Après quelques essais et ajustements pour positionner parfaitement l'électrode, Sandrine ressent des fourmillements qui ne sont pas douloureux. « *Ça fait du bien* », précise-t-elle. Elle se rendort et le chirurgien peut refermer tout en laissant les fils sortir du corps pour les relier au boîtier temporaire. Deux heures plus tard, l'infirmière repasse la voir dans sa chambre où elle va rester une nuit, lui explique le maniement de la télécommande, les précautions à prendre et lui rappelle que seuls deux sports (parachutisme, plongée au-delà de 10 mètres) lui sont désormais interdits. « *On a huit jours pour peaufiner ensemble les réglages, faites-vous confiance, on va se revoir.* » Sandrine lui sourit, regarde sa « boîte », sa télécommande, les documents explicatifs sur la table de nuit. Prête pour une nouvelle vie. ■

12 millions
de personnes en France souffrent de douleurs chroniques.

70 %
ne reçoivent pas de traitement approprié.

Moins de 3 %
bénéficient d'une prise en charge dans une structure spécialisée dans les douleurs chroniques.

* Les autres centres en France : Poitiers, Nice, Lyon, Paris, Nantes, Lille.

La cigarette électronique en plein brouillard

L'utilisation de la cigarette électronique souffre des atermoiements des autorités de santé et de l'absence d'étude de grande ampleur sur l'efficacité de cet outil de sevrage du tabac. L'innocuité des liquides inhalés fait toujours débat. Décryptage.

Vingt ans de recul et pourtant jamais le « smog » des cigarettes électroniques n'a été aussi épais. En octobre 2021, le Royaume-Uni annonce que cet outil de sevrage se doit d'être considéré comme un véritable dispositif médical, invitant les médecins à les prescrire. Sans disposer de données scientifiques différentes, la France donne, le 4 janvier dernier, le signal exactement inverse : le Haut Conseil de la santé publique (HCSP) recommande aux professionnels de santé de ne pas proposer les systèmes électroniques de délivrance de la nicotine à ceux qui voudraient en finir avec le tabac. Un avis contraire à celui qu'il avait lui-même publié en 2016. Dans les faits, la cigarette électronique est pourtant devenue le premier outil de sevrage utilisé par les fumeurs. Mais dans son dernier avis, le HCSP estime ne pas avoir de preuves scientifiques suffisantes pour établir sa balance bénéfices-risques.

LE VAPOTAGE CHEZ LES FRANÇAIS

Un tiers des Français l'a testé

37,4 % ont déjà expérimenté le vapotage.

4,3 % vapotent quotidiennement.

(Source : Baromètre de Santé publique France, 2020.)

Un boom chez les adolescents

52 % avaient expérimenté l'e-cigarette en 2018 (35 % en 2015).

(Source : enquête EnClass de l'OFDT.)

Le premier outil de sevrage

14,8 % ont utilisé une vapoteuse.

11,7 % les autres traitements nicotiniques de substitution.

2,8 % ont associé les deux.

(Source : Bulletin épidémiologique hebdomadaire de janvier 2021.)

« C'est une position un peu schizophrène », reconnaît le Dr Ivan Berlin, membre du groupe de travail du HCSP et secrétaire général adjoint à la recherche de la Société francophone de tabacologie. Pourtant, l'enjeu sanitaire est majeur. Selon Santé Publique France, *« le tabagisme reste toujours la première cause de mortalité évitable avec plus de 75 000 décès »* annuels estimés.

Mais que dit vraiment la science ? Force est de constater qu'elle bute avant tout sur les incohérences des études portant sur l'efficacité de l'e-cigarette en tant qu'outil de sevrage. La dernière en date, parue en février dans *BMJ Tobacco Control*, dans laquelle 3578 fumeurs ont été suivis pendant deux ans, conclut que la cigarette électronique fait moins bien que les traitements de substitution nicotinique. 10 % des vapoteurs avaient réussi à se sevrer contre 18 % dans l'autre groupe. Pourtant, une étude parue en 2019 dans le *New England Journal of Medicine* par-

SHUTTERSTOCK

Le risque de maladie pulmonaire obstructive chronique augmente de 194 % avec les cigarettes électroniques, contre +704 % pour les cigarettes classiques, selon une étude de 2020.

venait au résultat exactement inverse, avec 18 % d'abstinents chez les vapoteurs contre 10 % chez les utilisateurs de substituts nicotiniques… Efficace ou non, le débat reste donc ouvert.

Il n'existe pas d'études de grandes cohortes de vapoteurs

En attendant de trancher, se pose la question de l'innocuité de la vapoteuse. Or, comme l'e-cigarette n'est ni un médicament, ni un dispositif médical, les fabricants ne sont pas tenus de produire des études pour obtenir le droit de mettre leurs produits sur le marché. Certes, contrairement à la cigarette traditionnelle, la cigarette électronique n'occasionne aucune combustion et ne dégage donc pas de substances cancérogènes telles que le monoxyde de carbone. Mais, les e-liquides ne sont pas sans danger, notamment sur les poumons.

En 2014, le Pr Philippe Camus, ancien chef du service de pneumologie et réanimation respiratoire du CHU de Dijon, a commencé à collecter dans la littérature scientifique tous les effets secondaires pulmonaires liés à l'e-cigarette dans sa base de données Pneumotox : *« Les premiers signaux sont la toux, de l'asthme, des pneumopathies, mais cela peut aller jusqu'à des syndromes de détresse respiratoire aiguë, à des aggravations de BPCO* [bronchopneumopathie chronique obstructive], *voire jusqu'à des poumons blancs où toutes les alvéoles contiennent des dérivés de la vapeur »*, détaille-t-il. Une étude parue en 2020 dans *European Heart Journal* a comparé le risque de maladie pulmonaire obstructive chronique : il est accru de 194 % avec les cigarettes électroniques, contre 704 % avec les cigarettes classiques. Risque inférieur donc, mais loin d'être nul.

La vaporisation des e-liquides pourrait aussi endommager les vaisseaux sanguins, le cœur et le cerveau. Certaines revues de la littérature scientifique suggèrent une augmentation du stress oxydatif, une rigidification des artères et donc un risque d'infarctus et d'AVC. Mais, à nouveau, les effets néfastes de la cigarette électronique ne sont pas clairs. Pourtant, après vingt ans de commercia-

ANSES

« Sur 1775 substances, nous en avons identifié 106 dont il faut évaluer les risques en priorité »

Benoît Labarbe, responsable de la mission tabac à l'Anses

LOBBYING

Quand les cigarettiers recyclent leurs méthodes

L'industrie du tabac n'a pas cessé ses actions de lobbying. Dernier épisode : une étude prouvant que la nicotine protège contre le Sras-CoV-2 a été rétractée en 2021 en raison des conflits d'intérêts de certains de ses auteurs. L'e-cigarette n'échappe pas à ces méthodes. *« Comme les cigarettiers avaient besoin de relais de croissance, ils ont acheté des fabricants d'e-cigarettes. Il faut donc être vigilant sur les auteurs des études »*, prévient le Pr Philippe Camus, ancien chef de service pneumogie au CHU de Dijon. Altria, propriétaire de Marlboro, possède par exemple 35 % de Juul. Philippe Camus s'appuie sur une revue systématique de 826 études, publiée en 2019, pour asseoir ses propos. *« Elle montre bien que lorsque les études sont soutenues financièrement par des industriels, la part de celles en faveur de l'innocuité de la cigarette électronique augmente. »* Et le lobbying touche même des institutions sanitaires. Un article du *Lancet* a ainsi révélé qu'un rapport de 2015 d'une agence de santé publique britannique, le Public Health England, affirmant que *« les e-cigarettes sont environ 95 % moins nocives que le tabac »*, s'appuyait sur une étude dont trois des auteurs étaient rémunérés par des fabricants d'e-cigarettes.

lisation, les premiers adeptes de la vapoteuse ne devraient-ils pas apporter une réponse ? *« Nous n'avons toujours pas de grandes cohortes de vapoteurs »*, se désole Ivan Berlin. En clair, l'adoption d'un dispositif par un grand nombre ne vaut pas étude scientifique. Et le flou demeure. Mais par-delà le dispositif, une autre question s'est invitée dans le débat durant l'été 2019 : la nature des liquides utilisés. Cette année-là, les États-Unis ont enregistré une cinquantaine de décès consécutifs à des maladies pulmonaires chez des vapoteurs. Après enquête, le coupable fut identifié : de l'acétate de vitamine E, ajouté pour « couper » l'e-liquide. L'événement a poussé à surveiller la toxicité inhérente à l'utilisation des produits de vapotage. Santé Publique France a ainsi mis en place, fin 2019, un dispositif de signalement des cas de pneumopathies sévères survenus chez des utilisateurs de cigarettes électroniques. Le dernier bilan de janvier 2020 fait état de cinq cas.

De quoi conforter le travail de l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail), chargée en 2016 de recueillir auprès des fabricants les déclarations de composition. *« Sur 1775 substances, nous en avons identifié 106 dont il faut évaluer les risques en priorité »*, indique Benoît Labarbe, responsable de la mission tabac à l'Anses. Dans cette liste publiée en janvier, la plupart des substances sont cancérogènes. *« Mais la composition ne fait pas tout,* rappelle-t-il. *Une fois chauffées, ces substances en émettent d'autres. Le sucralose, un édulcorant, peut par exemple se dégrader en chloropropanol, qui a un potentiel cancérogène. »* La dangerosité peut aussi être liée à l'interaction entre les substances, aux modalités de vapotage, ou encore au matériel lui-même. Pour mesurer tous ces paramètres et estimer les niveaux d'exposition réels, l'Anses va utiliser un robot à vapoter. Mais les résultats ne sont pas attendus avant deux ans et demi. Et ils sont déjà sujets à caution.

SYSPEO/SIPA

Le grand nombre de substances ne permet pas d'effectuer une recherche exhaustive de tous les dangers.

Composer soi-même ses liquides accroît les risques

« Il y a un angle mort dans la réglementation, prévient Benoît Labarbe. *Les fabricants proposent de composer soi-même ses liquides en dosant des arômes qui, eux, ne sont pas soumis à l'obligation de déclaration. »* Or, un tiers des vapoteurs opteraient pour cette solution. D'autre part, la transparence des fabricants n'est pas parfaite. En faisant la somme de tous les ingrédients, les experts de l'Anses ne parvenaient pas toujours à 100 %. Et *« le grand nombre de substances n'a pas permis d'effectuer une recherche exhaustive des dangers pour chacune d'entre elles »*, concède l'agence.

En attendant des études probantes, quelle place doit-on donner à cet outil ? Dans un rapport publié en mai 2021, la Commission européenne estimait que *« dans la mesure où les cigarettes électroniques sont des aides au sevrage tabagique, leur réglementation devrait suivre la législation pharmaceutique »*. L'interdiction des liquides aromatisés, déjà prévue au Danemark et en Lituanie, est aussi à l'étude. ■ **Cécile Coumau**

@cecilecoumau

72H POUR DÉCOUVRIR ET PRÉSERVER LES TRÉSORS DE NOTRE PLANÈTE BLEUE

GRAND OCEAN

DU 7 AU 9 OCT. 2022

À LA CITÉ DE LA MER, CHERBOURG-EN-COTENTIN
À SAINT-VAAST-LA-HOUGUE

& EN DIGITAL

www.grandocean-event.com

Partenaires Officiels

CHERBOURG en Cotentin

leCotentin
COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION

NAVAL GROUP

Partenaires Associés

LA MANCHE
LE DÉPARTEMENT

RÉGION
NORMANDIE

Organisé par

Les Echos
Le Parisien
ÉVÉNEMENTS

SCIENCES AVENIR
La Recherche

Que valent les alternatives au sucre raffiné ?

Utilisés en plus petites quantités et en vérifiant bien leur origine, les sucres bruts comme le miel ou le sirop d'érable ont des arguments sérieux à faire valoir.

Sirop d'érable, miel, muscovado… Ces sucres bruts sont présentés par les industriels comme des concurrents du sucre de table, issu de la canne à sucre ou de la betterave sucrière (90 % des volumes consommés en France). Avec leurs notes parfumées et leur saveur légèrement caramélisée, ils permettent d'avoir la main plus légère pour donner du goût à un yaourt ou pour préparer un gâteau. Toutefois, ces produits restent avant tout du sucre, mauvais pour la santé lorsqu'il est consommé en excès. À déguster donc, aussi, avec parcimonie.

Ils fournissent quelques minéraux

Contrairement aux sucres raffinés (tel le sucre blanc de canne), le miel, la mélasse, le sucre de canne complet (rapadura et muscovado) et les sirops (érable, agave, dattes) conservent quelques minéraux (potassium, calcium, magnésium) après leur production. Mais ces teneurs restent faibles au regard des quantités consommées. Par exemple, une cuillère à café (5 g) de sirop d'érable (extrait de la sève bouillie de l'arbre) fournit 11 mg de potassium et 5 mg de calcium, quand les besoins journaliers sont respectivement de 3500 mg et de 750 mg (1). Ils contiennent également des composés phénoliques (québécol, catéchine), antioxydants. À noter que le caractère antiseptique du miel est lié à la présence de molécules aromatiques — plus d'une quarantaine dont le linalol, le menthol, etc. — et de défensine-1, une protéine qui, en s'agrégeant à la cellule bactérienne, provoquerait sa destruction (2).

5 millions de tonnes

de sucre de betterave et 200 000 tonnes de sucre de canne ont été produites en 2019-2020 en France, premier producteur sucrier européen, loin derrière le Brésil, leader mondial avec 30 millions de tonnes.

SOURCE : FRANCE AGRIMER.

Ils ont un fort pouvoir sucrant

Tous les sucres ne procurent pas la même intensité en bouche.

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

SUCRE RAFFINÉ Sucre ayant subi des opérations chimiques de purification ou de décoloration. Plus un sucre est raffiné, moins il conserve de minéraux.

MÉLASSE Sous-produit de la fabrication du sucre de canne ou de betterave. Ce liquide noir et épais est obtenu après extraction du jus, évaporation et centrifugation.

POUVOIR SUCRANT Capacité d'un composé chimique à être perçu comme du sucre. Il est déterminé par rapport à une référence, le saccharose, au pouvoir sucrant de 1.

Le pouvoir sucrant de la stévia, plante originaire d'Amérique du Sud, est 50 à 300 fois supérieur à celui du sucre de table — le saccharose —, composé de glucose et de fructose. De même, le miel et le sirop d'agave (issu de la sève de l'agave bleue, un cactus du Mexique), avec un pouvoir sucrant respectivement de 1,1 et 1,5, peuvent être consommés en moindres quantités tout en gardant une sensation sucrée importante (3). Par ailleurs, les sucres bruts permettent d'alléger la facture calorique. Compter 13,5 kcal pour une cuillère à café (5 g) de sirop d'érable, 15 kcal/5 g de sirop de dattes (jus obtenu à partir de dattes cuites et pressées) et de sève de kitul (extraite de la tige de la fleur d'un palmier du Sri Lanka), contre 20 kcal/5 g de sucre blanc.

Certains font peu varier la glycémie

Les sucres à bas index glycémique (IG en dessous de 55, celui du sucre blanc étant de 70) induisent une montée progressive du taux de sucre dans le sang, ce qui régule la satiété et évite les hypoglycémies (baisses soudaines et brutales du taux de sucre sanguin) réactionnelles, sources de fringales. Par conséquent, ils peuvent être consommés avec modération par des personnes diabétiques. C'est le cas du sirop d'agave avec un IG de 10, ainsi que du sucre de coco (issu de la sève des fleurs de cocotier) et du sirop de dattes qui ont un IG de 54. En revanche, avec un IG particulièrement élevé de 98, il faut éviter le sirop de riz, issu de la fermentation de riz brun (4).

Attention à l'excès de fructose

Le sirop d'agave apporte 60 g/100 g de fructose pour 70,2 g/100 g de sucre total (5). Élaboré à partir du nectar (solution aqueuse plus ou moins sucrée) de fleurs ou de miellat d'arbre — pin, érable, sapin, etc. —, le miel en fournit 40 g/100 g pour près de 80 g de sucre et le sirop de bouleau (obtenu à partir de la sève du bouleau) 54 g/100 g. Attention à ne pas en abuser, car le fructose est capté majoritairement par le foie. Le consommer en excès induit une augmentation du cholestérol dans le sang, ainsi qu'une accumulation de triglycérides dans le foie, à l'origine de la stéatose hépatique non alcoolique ou maladie du foie gras. Des apports élevés de fructose pourraient également empêcher le bon fonctionnement du système immunitaire (6).

Ils ne sont pas toujours 100 % naturels

La stévia, naturellement verte, n'est souvent présente qu'à hauteur de 1 % dans les sticks ou morceaux vendus dans le commerce. De plus, ses molécules sucrantes, les glycosides de stéviol, sont reproduites chimiquement sous la forme d'une poudre blanche. Attention à ne pas confondre le sucre de canne complet et le sucre roux (ou cassonade), légèrement moins raffiné que le sucre de table mais dont certains sont produits à partir de sucre blanc coloré avec du caramel. Gare aussi au miel falsifié (c'est-à-dire mélangé à des sucres industriels), souvent importé de Chine et reconstitué avec des sirops de fructose ou de riz. Le sirop d'agave peut être adultéré avec du sucre issu du maïs. Pour ne pas se tromper, mieux vaut privilégier les circuits courts et se tourner vers des labels (IGP, bio, équitables). ■

Sylvie Boistard
@syboistard

(1) Références nutritionnelles en vitamines et minéraux, Anses.

(2) How honey kills bacteria, Kwakman P. H. S. et al, *The Faseb Journal*, 2010.

(3) Actualisation des repères du PNNS : établissement de recommandations d'apport de sucres, Anses, 2016.

(4) International tables of glycemic index and glycemic load values 2021: a systematic review, Atkinson F. S. et al, *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2021.

(5) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(6) Fructose reprogrammes glutamine-dependent oxidative metabolism to support LPS-induced inflammation, Jones N. et al, *Nature Communications*, 2021.

MÉLANIE MERCIER Diététicienne-nutritionniste à Paris

Se déshabituer du goût sucré

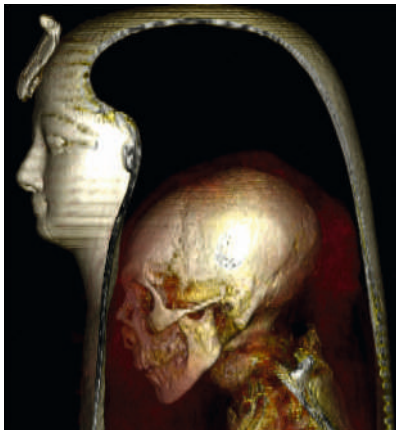
« Quelle que soit sa forme, il est conseillé de ne pas dépasser 25 g de sucre par jour. Cela équivaut à cinq cuillères à café de miel ou de sirop d'érable si on exclut la consommation annexe de produits transformés. Mais l'idéal est de se déshabituer progressivement du goût sucré. C'est possible en deux à trois semaines, le temps pour les papilles gustatives de se régénérer. Pour cela, on réduit progressivement la quantité de sucre dans les gâteaux et on le remplace dans son yaourt par des morceaux de fruits, également sources de fibres, de minéraux et de vitamines. »

Amenhotep Ier
Autopsie numérique d'un pharaon

La momie du souverain égyptien a été scannée par une équipe de paléo-radiologues et les images obtenues ont permis de reconstruire le corps en 3D. Morphologie, blessures, ornements funéraires… La moisson scientifique de cette opération hors norme est à la hauteur des espérances.

Par Sylvie Briet

« *Le sujet, un homme d'environ 35 ans, présente des traces de blessures infligées* post mortem *mais rien ne permet d'établir la cause de sa mort.* » La phrase pourrait être extraite d'un rapport d'autopsie destiné à une enquête policière. Mais le patient est décédé voilà plus de 3000 ans ! Amenhotep Ier, pharaon de 1525 à 1504 avant notre ère, deuxième roi de la prestigieuse XVIIIe dynastie, celle qui marque l'apogée de la civilisation égyptienne antique, a connu un règne paisible. Le XXIe siècle le remet sous les feux de la rampe : sa momie, une des rares aujourd'hui qui n'aient jamais été dévoilées, a été étudiée de façon virtuelle. Pas une seule bandelette ne lui a été retirée, si ce n'est numériquement. Sahar Saleem, professeure de radiologie à l'université du Caire (Égypte), experte internationale en paléo-radiologie, l'a passée au CT-scan, un scanner de tomographie assistée par ordinateur, une méthode non invasive utilisée couramment en médecine et appliquée ici en paléo-radiologie. La chercheuse égyptienne a réalisé des milliers de coupes du corps de la momie, plus fines qu'un cheveu, rassemblées ensuite pour reconstruire le corps en 3D. Elle publie ses conclusions dans un article de *Frontiers in Medicine* cosigné par Zahi Hawass, ancien ministre sous le régime d'Hosni Moubarak, de retour au service des Antiquités égyptiennes.



COURTESY SAHAR N. SALEEM AND ZAHI HAWASS

Pénétrant sous le masque de bois peint en jaune, s'immisçant sous les bandelettes de lin, les rayons ont dévoilé des détails inconnus jusque-là. La momie est couverte de la tête aux pieds de guirlandes de fleurs de couleurs rouge, jaune et bleue. Elle porte sous les bandages une ceinture de perles et d'or, une trentaine de bijoux et d'amulettes, dont l'une est placée sur le cœur. Le corps a été éviscéré à travers une incision verticale sur le flanc gauche, une méthode courante. En revanche, de manière inattendue, le cerveau est toujours présent. *« Il s'est affaissé à l'arrière du crâne,* a constaté Sahar Saleem. *Durant la XVIIIe dynastie, les embaumeurs ont le plus souvent retiré le cerveau des momies royales ; ils introduisaient un outil dans une narine pour casser la partie fra-*

COURTESY SAHAR N. SALEEM AND ZAHI HAWASS

Pas une seule bandelette n'a été retirée de la momie d'Amenhotep Ier, dont les différentes couches constitutives ont pu être visualisées grâce à la tomodensitométrie.

DÉCOUVERTE

Le destin mouvementé de la cache royale

Amenhotep Ier revient de loin ! Pillé, caché, redécouvert par des voleurs… La vie dans l'au-delà n'est pas un long fleuve tranquille. Le pharaon reposait dans la cachette de Deir el-Bahari, tombe creusée dans la montagne au nord-ouest du temple d'Hatshepsout lorsqu'en 1870, les deux frères Abd el-Rassoul, habitants de la région, mirent au jour cette caverne. Ils gardèrent le secret pour eux et revendirent durant dix ans ses trésors — papyrus, statuettes funéraires, bijoux… Cette profusion d'antiquités provenant des XIe et Xe siècles avant notre ère attira l'attention des spécialistes. Gaston Maspero, alors directeur du service des Antiquités égyptiennes, fit mener l'enquête qui désigna rapidement les frères Abd el-Rassoul. Ils nièrent d'abord, avant que l'un des deux n'avoue leur trafic. Le 5 juillet 1881, il mena les archéologues à l'une des plus incroyables découvertes de l'égyptologie : une trentaine de momies, dont celles des plus grands pharaons : Thoutmôsis III, Séthi Ier, Ramsès II et… Amenhotep Ier ! Elles étaient accompagnées de 5000 à 6000 objets. Malheureusement, par crainte de nouveaux vols, l'assistant de Gaston Maspero vida la cachette de façon expéditive et brouillonne, sans relevés ni croquis. Certaines momies en perdirent leur identité. Tandis que d'autres nous sont dévoilées encore aujourd'hui.

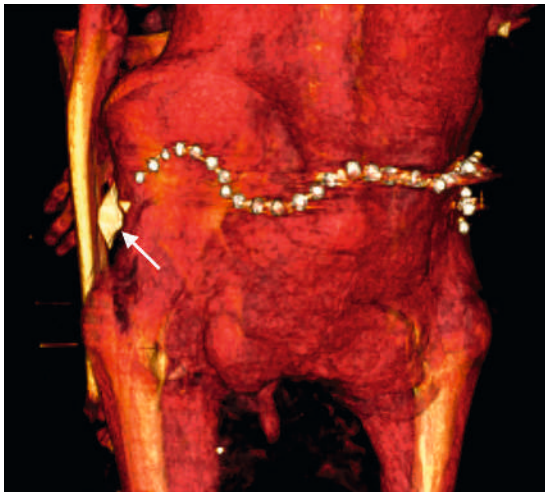
G. SIOEN/DEA/AKG IMAGES

La momie d'Amenhotep Ier fut cachée dans la montagne de Deir el-Bahari, près du temple d'Hatshepsout (ci-dessus).

gile de la base crânienne antérieure, ôtaient la matière molle et remplissaient le crâne avec du matériel d'embaumement. On ignore pourquoi certains pharaons comme Thoutmosis II ou Amenhotep Ier l'ont conservé. » Une pratique étonnante sachant que la décérébration était devenue très répandue au cours de la XVIIIe dynastie, pour atteindre son pic durant les Ptolémées (323 à 30 avant notre ère).

La radiologue égyptienne trace un portrait précis d'Amenhotep Ier, qui n'en était pourtant pas à son premier examen médical. En 1932, Douglas Derry, professeur à l'école de médecine du Caire, le sortit de son cercueil pour — déjà ! — le passer aux rayons X. Il estima alors son âge entre 40 et 50 ans. En 1967, des scientifiques de l'université du Michigan (États-Unis) renouvelèrent l'examen pour le rajeunir considérablement : 25 ans ! L'étude de Sahar Saleem donne finalement un âge de 35 ans à Amenhotep Ier lors de son décès. Une estimation plus rigoureuse qui repose sur la fermeture épiphysaire des longs os (qui marque l'arrêt de la croissance) et sur la morphologie de l'articulation antérieure du bassin. Si le squelette mesure 1,61 mètre dans sa boîte mortuaire, sa taille réelle est évaluée à 1,69 mètre compte tenu des fractures et de la taille du tibia. Un chiffre comparable à la plupart des rois du Nouvel Empire, entre les 1,67 mètre de Toutankhamon et 1,72 mètre de Ramsès II. Autres découvertes : Amenhotep était circoncis comme ses contemporains, et il possédait une dentition parfaite. Enfin, quelques boucles de cheveux restent visibles à l'arrière du crâne, et son oreille gauche est ornée d'un petit piercing. « *Il ressemblait à son père,*

> « Il ressemblait à son père, Ahmosis Ier. Ils partagent tous les deux ce visage ovale, avec un menton et un nez étroits »
>
> **Sahar Saleem,** professeure de radiologie à l'université du Caire, experte internationale en paléo-radiologie



COURTESY SAHAR N. SALEEM AND ZAHI HAWASS

Le scanner effectué par la radiologue Sahar Saleem (à gauche) a permis de révéler les traits du visage du pharaon et même sa dentition (à droite), ainsi que des parures sur son corps, comme cette ceinture de perles assortie d'une amulette (ci-dessous, flèche).

Ahmosis Ier, dont nous conservons la momie au musée de Louxor, précise Sahar Saleem. *Ils partagent tous les deux ce visage ovale avec un menton et un nez étroits. Les études génétiques d'aujourd'hui montrent que les gènes ont un impact important sur les caractéristiques faciales, ce qui explique qu'elles passent de génération en génération.* »

Pillée et abîmée, la momie avait déjà été restaurée

Outre la description physique du pharaon, le scanner révèle des détails fascinants sur l'histoire du roi après sa mort. La momie d'Amenhotep Ier a été découverte en 1881 dans la cache royale de Deir el-Bahari, près de la Vallée des Rois, face à Louxor *(lire l'encadré ci-contre)*. Les hauts dignitaires de la XXIe dynastie (1069-945 avant J.-C.) y avaient caché une vingtaine de momies royales du Nouvel Empire pour les protéger des voleurs. Amenhotep a subi les outrages des pilleurs et de nombreuses blessures *post mortem* sont visibles : fracture du nez, décapitation, main droite séparée de son poignet, bras gauche disloqué : deux doigts manquants à la main gauche reposent dans un trou de la cavité abdominale.

Or, ces blessures ont été traitées par les embaumeurs de la XXIe dynastie. Cinq siècles après sa mort, Amenhotep a ainsi été « restauré » deux fois, d'abord par Pinedjem Ier, grand prêtre d'Amon à Thèbes, et dix ans plus tard par son fils Masaharta, comme l'indiquent des hiéroglyphes sur le sarcophage. Ils ont remis la tête sur le cou avec des bandes de lin traitées à la résine. Ils ont couvert un trou dans la paroi abdominale et introduit deux amulettes, replacé le bras gauche à côté du corps et l'ont réenveloppé. Le membre droit montre que les bras étaient à l'origine repliés en croix sur la poitrine, une position osirienne qui devait devenir courante et qu'Amenhotep est le premier connu à adopter.

Ainsi, et surtout, le scanner rectifie une idée fausse. Contrairement à ce que l'on croyait, les grands prêtres de la XXIe dynastie étaient animés de bonnes intentions. « *Auparavant, nous pen-*

POUR EN SAVOIR PLUS

« Momies, les chemins de l'éternité »
Hôtel des expositions, Draguignan (Var).
Du 10 juin au 25 septembre.

PHILIPPE CHARLIER

MÉDECIN LÉGISTE, ARCHÉO-ANTHROPOLOGUE, DIRECTEUR DU DÉPARTEMENT DE LA RECHERCHE ET DE L'ENSEIGNEMENT AU MUSÉE DU QUAI-BRANLY-JACQUES-CHIRAC

« Le scanner permettra de reconstituer son visage »

Pourra-t-on découvrir un jour la cause de la mort d'Amenhotep Ier ?
Amenhotep Ier ne souffrait pas de pathologie identifiable, cela ne veut pas dire qu'il était en bonne santé. Il a pu mourir d'une pneumonie ou d'un cancer du pancréas. Avant les vaccins et les antibiotiques, les infections représentaient en effet la première cause de décès. Pour le savoir, il faudrait étudier les tissus mous. Mais les viscères qui ont été retirés constituent des pièces essentielles manquantes.

JACK TRIBECA/BESTIMAGE

Aujourd'hui, la momie a subi l'examen le plus performant. Y ajouter une fibroscopie permettrait peut-être d'obtenir son ADN comme celui de potentiels agents infectieux.

Pourra-t-on encore passer la momie au scanner sans l'abîmer ?
Oui, les rayons ne dégradent pas la momie sur le plan physique. Mais ils peuvent abîmer un peu l'ADN, qui est difficile à obtenir sur les momies égyptiennes. Les rayons pourraient également perturber les datations au carbone 14, mais le problème ne se pose pas pour Amenhotep Ier, dont le règne est bien identifié.

En quoi cette approche change-t-elle les recherches sur les momies ?
Leur étude est sans fin. Le scanner permet par exemple de reconstituer le visage du défunt de façon réaliste, à partir des traits de la surface du crâne. Pour cela, il faut superposer des épaisseurs stéréotypées de peaux, muscles, tissus adipeux sur une surface osseuse, à partir des milliers d'observations médico-légales sur le mort. La part d'incertitude concerne la couleur des yeux, le type de coiffure ou la couleur de la peau, quand on ne peut faire de microscopie ni définir la concentration des pigments de mélanine. La limite consiste à vouloir donner une expression, alors qu'une neutralité totale s'impose. Ce n'est pas de l'art mais un travail scientifique. ■

Propos recueillis par S. B.

sions qu'ils voulaient réutiliser le matériel funéraire royal pour leur propre compte, reconnaît Sahar Saleem. *En réalité, ici, ils nous offrent un beau travail de restauration.* » Un point de vue partagé par Philippe Charlier, médecin légiste, archéo-anthropologue : « *La gestuelle de la profanation de la momie a pu être reconstituée. Il y a eu une restauration d'intégrité corporelle dans la mesure du possible, avec un rebandelettage partiel et l'ajout de nouveaux talismans qui permettent de reconsacrer Amenhotep après la désacralisation temporaire due aux profanateurs de sépulture.* »
Peu de chances d'en savoir plus rapidement sur ce célèbre pharaon : Sahar Saleem, qui travaille dans le cadre de l'Egyptian Mummy Project visant à scanner les momies du Nouvel Empire, n'a pas l'intention de réaliser des analyses qui pourraient endommager Amenhotep. C'est que, par le passé, la plupart des momies royales ont été « débandelettées » et sérieusement abîmées, comme celle de Toutankhamon.

Une nouvelle demeure pour les momies royales

La momie d'Amenhotep Ier est demeurée intacte grâce à Gaston Maspero, directeur des Antiquités égyptiennes lors de sa découverte en 1881. Il voulait préserver ses bandelettes parfaitement disposées et son magnifique masque mortuaire. « *Dans le futur, avec les progrès techniques, nous pratiquerons sans doute d'autres examens qui pourront nous en apprendre plus* », prévoit Sahar Saleem, qui a déjà scanné 40 momies du Nouvel Empire.
Quant à Amenhotep, qui reposait depuis 1902 au Musée égyptien de la place Tahrir, au Caire, c'est accompagné de 21 autres momies royales qu'il a rejoint en avril 2021, lors d'une cérémonie « pharaonique », le Musée national de la civilisation égyptienne, dans un quartier du Vieux-Caire. Il ne devrait plus être dérangé, si ce n'est par les visiteurs qui pourront l'admirer à partir du 18 avril. ■

HIROHITO NOMOTO / THE YOMIURI SHIMBUN / AFP

Le kofun Daisenryō (préfecture d'Osaka) fait partie d'un ensemble de 49 tombes inscrit au patrimoine mondial de l'Unesco en 2019.

Ces mystérieux tertres funéraires japonais

Les tombes des premiers empereurs japonais livrent depuis le ciel un secret invisible au sol : ces milliers de tertres pointent vers l'est. Un hommage à la déesse du Soleil Amaterasu, qui serait à l'origine de la lignée impériale.

Une porte vers l'au-delà. Avec leur forme évoquant un trou de serrure, c'est ce qu'inspirent aujourd'hui les tertres funéraires bâtis par les habitants de l'archipel japonais entre le IIIe et le VIIe siècle après J.-C. Une forme sans autre équivalent dans le monde, hormis quelques exemples en Corée mais peut-être inspirés des constructions japonaises. Baptisés « kofun » — littéralement « tombes des anciens » —, il en existerait 160 000 sur le territoire (dont certains évoquent plutôt la forme de carrés, de cercles ou de coquilles Saint-Jacques). Un tiers dépasserait les 150 m de long, ce qui rend leur forme imperceptible depuis le sol. Le plus majestueux, le kofun Daisenryō, serait même le plus long édifice funéraire connu *(lire l'encadré p. 83)*. Les plus grands sont attribués aux premiers empereurs du Japon. Des souverains auxquels on prête une dimension divine. Les plus modestes — dont sans doute beaucoup ont disparu — auraient été édifiés en l'honneur de membres de la famille impériale ou

de sa cour. Dans un article publié au début de cette année, des chercheurs sont parvenus à étudier leur orientation. *« C'est la première fois que la direction de l'axe des principaux tumuli en trou de serrure a été systématiquement analysée. Une étude sans précédent pour cette période »*, confirme Koji Mizoguchi, professeur d'archéologie à l'université impériale de Kyūshū, à Fukuoka (Japon), qui n'a pas participé à l'étude.

Les tertres pointent vers le soleil levant

C'est que, jusqu'à ce jour, les kofun conservent une grande part de leur mystère. Aucun écrit ne conte leur réalisation. Tout juste sait-on que l'archipel, en quête d'une première unification étatique, baignait à cette époque dans une culture shintoïste. Très peu ont été fouillés. Faute de pouvoir effectuer des relevés de terrain — la plupart des kofun sont aujourd'hui protégés par des grillages imposés par l'Agence impériale japonaise en raison de leur caractère sacré —, trois scientifiques de l'École polytechnique de Milan (Italie) ont analysé des images à haute résolution (avec une précision atteignant les 30 centimètres) prises par satellite. Après avoir ainsi mesuré les dimensions d'une centaine d'entre eux, les chercheurs ont conclu que les tertres n'ont pas été orientés au hasard ou selon les contraintes du terrain : ils pointent pour leur très grande majorité vers le soleil levant. *« Le Soleil ne se lève exactement à l'est que deux jours par an, lors des équinoxes,* explique Norma Camilla Baratta, première signataire de l'étude. *Sa position à l'aube oscille en réalité au long de l'année entre deux points atteints au moment des solstices d'été et d'hiver. »* Et selon les mesures des chercheurs, 82 % des Kofun pointent dans la direction de cet arc décrit par le Soleil levant au cours de l'année.

ARCHAEOLOGICAL INSTITUTE OF KASHIHARA/KYODO

Visualisation 3D (générée à partir de données Lidar) du kofun de Gobyōyama (préfecture d'Osaka).

Mais la direction observée depuis l'extérieur reflète-t-elle celle de l'accès à la tombe — plus symbolique encore — à l'intérieur des kofun ? La question est délicate. Aujourd'hui, de ces tombes sacrées, on ne peut voir que des tumuli en terre, soumis à l'érosion et couverts de végétation. Cependant, des études plus anciennes ont montré qu'ils dissimulent des structures complexes, pensées pour résister aux affres du temps. *« Pour éviter l'érosion, les kofun ont été construits avec des couches d'argile et de sable, souvent recouvertes de cailloux et de pierres afin d'empêcher la croissance des végétaux »*, racontent les auteurs italiens dans leur publication, décrivant ainsi un aspect bien différent de celui qu'il est donné de voir désormais. Dans les plus anciens, la chambre funéraire se trouvait au fond d'un puits creusé depuis le sommet de la partie circulaire. Par la suite, c'est un couloir formé de gros blocs de pierre qui permettait d'y accéder.

Des corrélations probables avec la position de la Lune

Ce savoir provient de mesures effectuées au XIXe siècle, alors que les kofun étaient davantage accessibles. Elles sont l'œuvre en particulier d'un ingénieur britannique, William Gowland, considéré parfois comme le père de l'archéologie japonaise, mais également connu pour ses travaux archéologiques sur le site de Stonehenge, au Royaume-Uni. Il fut le premier à établir des relevés archéologiques des kofun. *« Très peu de tertres en trou de serrure ont été fouillés, ces mausolées impériaux étant considérés comme inviolables,* explique Norma Camilla Baratta. *Nous disposons néanmoins de certains plans, dont ceux que William Gowland a publiés en 1897, qui décrivent l'orientation des corridors conduisant aux chambres funéraires. Et ils révèlent qu'ils sont le plus souvent parallèles à l'orientation du kofun. »* Ce

RELIGION

Le pouvoir impérial et le culte d'Amaterasu

GIANCARLO COSTA / BRIDGEMAN IMAGES

D'après les croyances shintoïstes, les îles japonaises auraient été façonnées à partir de gouttes d'eau que deux dieux, Izanagi et sa sœur Izanami, auraient laissées couler depuis la lame d'une épée. Déesse du Soleil, Amaterasu *(illustration ci-contre)* serait née de l'œil gauche d'Izanagi. Selon la tradition, elle serait l'ancêtre du clan Yamato, dont descendrait la famille impériale jusqu'à nos jours. Son frère, dieu de la Lune, serait quant à lui né de l'œil droit d'Izanagi. *« Dans la croyance shintoïste, celui-ci aurait tué Uke-Mochi, la déesse de la nourriture. À la suite de cela, Amaterasu, furieuse, a refusé de voir son frère pour toujours, se déplaçant dans une autre partie du ciel. Et donnant naissance à l'alternance du jour et de la nuit »*, explique Norma Camilla Baratta, de l'École polytechnique de Milan (Italie), auteure de l'étude sur les kofun.

ARCHÉOLOGIE

Le kofun Daisenryō, la plus longue tombe du monde

En 2019, 49 kofun situés au-dessus de la plaine d'Osaka ont été inscrits au patrimoine mondial de l'Unesco, l'ensemble dit de Mozu-Furichi. Le plus remarquable se trouve dans la ville de Sakai : le kofun Daisenryō. Long de 486 m, haut de 36 m, ce n'est rien de moins que la plus longue tombe connue au monde. Il est attribué au 16e empereur du Japon, Nintoku. Protégé par l'Agence impériale du Japon, il n'a pas été fouillé. Comme les autres tertres gigantesques, il est strictement protégé par la loi, accueillant un empereur considéré comme sacré. Cependant, en 2018, l'autorisation a été donnée pour la première fois de creuser quelques tranchées sur les berges des douves qui l'entouraient. Les fouilles ont permis de mettre au jour des restes de « haniwa », des sculptures en argile prenant des formes figuratives ou de simples cylindres. Elles décoraient les tertres qui, selon d'autres fouilles archéologiques, recèlent également une variété d'objets funéraires tels que des armes ou des miroirs.

LISZT COLLECTION/AKG IMAGES

Cette sculpture en argile (« haniwa ») du VIe siècle, mise au jour dans le kofun Daisenryō, représente une servante de sanctuaire.

qui confirme la pertinence de l'étude des données satellitaires.
Quelle interprétation tirer dès lors de ces observations ? Dans la culture populaire, la dynastie impériale japonaise descend sans discontinuer de sa fondatrice, la légendaire déesse du Soleil Amaterasu *(lire l'encadré ci-contre)*. L'orientation des tertres funéraires aurait donc été choisie pour symboliser cette descendance. Mais ce n'est pas tout. Les mesures révèlent également que le Soleil n'est pas le seul astre que les bâtisseurs prenaient symboliquement en compte. L'analyse de la position du satellite naturel de la Terre est tout aussi intrigante. D'après les calculs des scientifiques, toutes les pleines lunes sont également visibles depuis les kofun ! Amaterasu ne serait donc pas la seule divinité vers laquelle s'orientent les tombes impériales. Elles rendraient également hommage à son frère, Tsukuyomi, dieu de la Lune.
« Les corrélations avec la position du Soleil et de la Lune à leur lever et à leur coucher sont statistiquement significatives », confirme Koji Mizoguchi. Selon ce docteur diplômé de l'université de Cambridge (Royaume-Uni), les variations dans les directions ne sont pas moins intéressantes. *« À une échelle plus locale, des caractéristiques particulières du paysage, comme le sommet d'une montagne, pourraient avoir été associées au lever ou au coucher du Soleil à une période particulière de l'année, pour définir la direction du tumulus. J'espère que des travaux futurs permettront de préciser ce point. »* Afin d'éclaircir peut-être les rites qui se déroulaient lors de l'inhumation des empereurs, et dont on ne sait hélas rien.

Reste la question de l'énigmatique forme des kofun. *« L'appellation "trou de serrure", qui traduit ce que l'on peut voir en prenant de la hauteur, est sûrement moderne,* concède Norma Camilla Baratta. *Une autre manière de les voir — qu'avait déjà avancée William Gowland — est que cette forme dérive de la combinaison d'un cercle et d'un carré ou d'un rectangle. »* En l'absence de sources écrites, les scientifiques ne peuvent que proposer des interprétations. Pour les chercheurs italiens, *« la forme curieuse et apparemment inexplicable du trou de serrure pourrait être identifiée comme une représentation du soleil levant derrière une montagne sacrée, tel un hommage au nom de la terre qui était sous la domination des empereurs »*. ■

Mathieu Nowak @mathieu_nowak

IGOR STEVANOVIC/ SCIENCE PHOTO LIBRARY / AFP

La multiplication des infiltrations malveillantes touche de plus en plus les particuliers. Parmi eux, les seniors représentent 28 % des victimes de fraudes en ligne aux États-Unis en 2020 (rapport IC3).

Cinq questions pour se protéger contre les cyber-risques du quotidien

Télétravail, paiement sans contact, digitalisation : les cyberpirates attaquent de plus en plus nos quotidiens transformés par la crise sanitaire. Comment s'en prémunir au mieux ?

Par Régis de Closets, avec Agence Forum News

1 Pourquoi les risques augmentent-ils chez les particuliers ?

Avec un salarié sur trois qui travaille à distance et 13 % des achats quotidiens réalisés par téléphone portable (données Fevad 2021), la pandémie a multiplié nos interactions numériques… et notre exposition aux cyber-risques ! Au Royaume-Uni, 2021 aura été la première année où les escroqueries à la carte bancaire se sont majoritairement réalisées par usurpation d'identité en ligne, et non par vol. En France, un utilisateur de PC sur quatre serait sous la menace d'une infiltration malveillante (étude du groupe Avast, 2021). La multiplication de ces attaques est liée à la numérisation de nos pratiques, mais aussi à l'évolution des modes d'intrusion. *« Les pirates s'organisent de plus en plus en vraies filières et orchestrent des attaques massives qui visent de larges publics à moindre coût »*, explique Gildas Avoine, professeur à l'Institut national des sciences appliquées (Insa) de Rennes et coauteur de *13 défis de la cybersécurité* (CNRS éditions). Certains publics, comme les seniors, seraient d'ailleurs très exposés selon l'IC3 (Internet Crime Complaint Center).

2 Quelles sont les principales menaces ?

Les confinements ont montré une augmentation mais aussi une évolution de la nature des piratages de particuliers. L'« hameçonnage » (*phishing* en anglais), autrement dit l'envoi de messages trompeurs ou le renvoi vers un site frauduleux, reste le principal mode de cyberattaque. Mais il prend des formes plus inattendues (avec des sollicitations par mail mais également par SMS) et, surtout, s'appuie sur des contenus de plus en plus individualisés. Les pirates rachètent désormais les données dérobées à d'importantes bases pour enrichir d'informations personnalisées leurs tentatives d'hameçonnage : adresse postale, mention de sites marchands récemment visités ou même numéro de sécurité sociale. Si l'objectif final est le détournement de fonds, cette technique à l'encontre des particuliers s'accompagne peu de demandes de rançons. Plus coûteux à déployer, les « rançongiciels » (programmes malveillants visant à extorquer de l'argent) ciblent encore principalement les entreprises.

3 Quels logiciels protègent efficacement ?

Pendant longtemps, un simple antivirus suffisait à bloquer les logiciels malveillants avant qu'ils n'infectent les ordinateurs. Malheureusement, l'explosion des attaques a réduit leur efficacité. En effet, leur fonctionnement repose sur

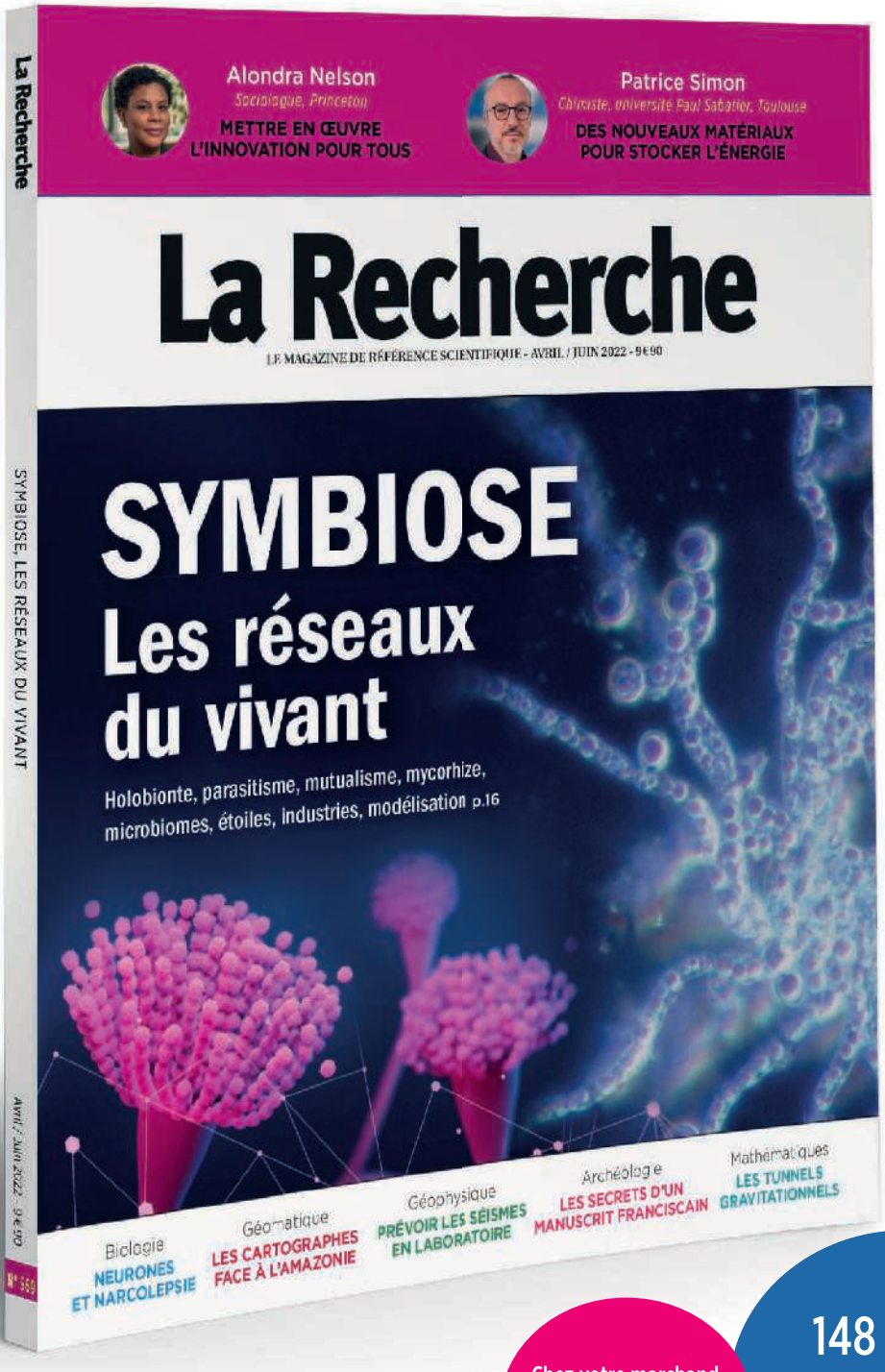
20 % des entreprises ont déclaré avoir été victimes d'une violation de sécurité liée à un travailleur distant (ÉTUDE MALWAREBYTES 2021)

1 euro est détourné pour 671 euros dépensés en achats à distance en 2020 (BANQUE DE FRANCE)

32 SCIENTIFIQUES
PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE



Chez votre marchand de journaux et chez votre libraire

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

JÉRÔME NOTIN, DIRECTEUR GÉNÉRAL DE CYBERMALVEILLANCE.GOUV.FR *

« Les modes d'attaque se sont diversifiés durant la pandémie »

CYBERMALVEILLANCE.GOUV.FR

Quel est l'impact de la crise sanitaire sur les cyberattaques à destination des particuliers ?
Il y a clairement eu une aggravation des infiltrations et actes malveillants durant cette crise. Un site comme le nôtre a vu sa fréquentation multipliée par cinq entre 2019 et 2021, sachant que 90 % de nos visiteurs sont des particuliers. Entre 2020 et 2021, le nombre d'assistances effectuées a progressé de 7,6 %. Nous constatons une diversification des modes avec un essor des hameçonnages par SMS, notamment les arnaques aux fausses livraisons qui se sont multipliées durant les confinements. Beaucoup d'arnaques se sont servies du compte personnel de formation, en créant de faux sites où s'inscrire : pas moins de 16 millions d'euros ont dû être remboursés pour ces seules fraudes…

Vous venez de lancer une campagne audiovisuelle de prévention de ces risques. Comment mieux sensibiliser le grand public ?
Ce sont les bons réflexes qui constituent les meilleures parades. Cette sensibilisation passe par des actions ponctuelles comme notre campagne, mais surtout par une mobilisation forte de l'ensemble des acteurs. Toute démarche en ligne devrait être accompagnée d'une prévention des risques. Les banques mais aussi les entreprises pourraient être plus proactives en la matière. Certains de nos voisins comme la Belgique ou le Royaume-Uni ont engagé des politiques de prévention nationales assorties de mesures fortes, comme des applications de signalement ou le blocage systématisé de tout site frauduleux. ■

Propos recueillis par R. de C.

* Dispositif national d'assistance des victimes d'attaques en ligne qui recense les actes malveillants et sensibilise aux risques numériques.

des annuaires de logiciels malveillants déjà connus. Or, non seulement l'inflation des attaques rend impossible l'actualisation des bases, mais surtout, les assaillants savent se camoufler et changer de signature numérique au cours d'un même assaut. *« Les antivirus constituent un premier filtre nécessaire mais plus suffisant,* confirme Nicolas Cote, consultant en sécurité au sein du groupe Tehtris. *Ils sont de plus en plus complétés par d'autres générations d'outils de détection et neutralisation s'appuyant sur des technologies d'intelligence artificielle ou de* machine learning [modèles d'analyse statistique] ». Ces outils repèrent les logiciels suspects à partir de leur comportement et de certains types d'actions. *« L'enjeu est de comprendre quelle partie de notre système est visée par le logiciel malveillant et d'en restreindre l'accès »,* complète Florent Kirchner, à la tête du département ingénierie logiciels et systèmes du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) à Saclay (Essonne).

4 Comment bien gérer ses mots de passe ?

Avec les logiciels de protection, les mots de passe sont les meilleurs garants d'environnements numériques sécurisés. À condition d'être bien employés… Omniprésents dans nos quotidiens numériques, ils requièrent des combinaisons secrètes toujours plus nombreuses et d'autant plus difficiles à mémoriser. Résultat ? Les mêmes formules types simples à retenir se répètent. Du pain bénit pour les cyberfraudeurs : en 2021, 200 000 Français ont été victimes d'un vol d'identité (selon la Banque de France). Pour prévenir les risques, les gestionnaires de mots de passe se multiplient, proposant des coffres-forts numériques où l'ensemble des mots de passe sont stockés et synchronisés. Cela permet de les renouveler régulièrement sans souci de mémorisation. L'authentification biométrique constitue une alternative, avec identification par empreintes digitales ou reconnaissance faciale. Le système est pourtant loin d'être infaillible. En 2014, un célèbre hacker avait recréé l'empreinte digitale d'Ursula von der Leyen, l'actuelle présidente de la Commission européenne, à partir de clichés où apparaissait son pouce !

5 Comment bien sécuriser le travail à domicile ?

La pandémie a ajouté pour les particuliers un niveau de menace supplémentaire : celui du télétravail. Avec des bureaux réinventés au gré d'ordinateurs personnels, la vie professionnelle s'effectue sur des périmètres de plus en plus difficiles à sécuriser. Identifier l'utilisateur ne suffit plus : il faut s'assurer également de la fiabilité du réseau ou de l'ordinateur utilisé. Pour gérer les risques, de plus en plus d'entreprises se convertissent au modèle « zero trust ». Ce système repose sur la multiplication de procédures : pour chaque application ou donnée sensible, des authentifications et accès temporaires sont accordés. Plus contraignant certes, mais plus sûr. *« Il ne s'agit plus de tout sécuriser en mode forteresse mais d'anticiper, en lien avec les usagers, des attaques devenues inéluctables »,* confirme Florent Kirchner. ■

Le Parisien
Aujourd'hui en France

PRÉSENTE MA TERRE

VOTRE NOUVEAU RENDEZ-VOUS
POUR UN QUOTIDIEN PLUS RESPONSABLE

RETROUVEZ-NOUS SUR :

Le Parisien MA TERRE
Pour un quotidien plus responsable

Aujourd'hui en France MA TERRE
Pour un quotidien plus responsable

TRANSVERSALES

SOMMAIRE

▶ C'est à lire
p. 88

▶ C'est à voir
p. 92

▶ Le ciel du mois
p. 93

▶ Chroniques
p. 94

▶ Questions de lecteurs
p. 96

▶ Solutions des jeux
p. 97

▶ Jeux
p. 98

SPL/AKG IMAGES

Vouloir faire revivre des espèces éteintes (ici, un « Nothronychus ») soulève des questions éthiques.

Le retour des dinosaures ?

Deux chercheurs signent un essai fascinant et pédagogique sur les tentatives de recréer des espèces disparues.

FANTASME Depuis *Jurassic Park*, *« qui n'a jamais imaginé, avec bonheur ou effroi, tomber sur un tyrannosaure rugissant au détour d'un chemin »* ? Le généticien évolutionniste Nadir Alvarez et le paléoichtyologue Lionel Calvin, tous deux du muséum d'Histoire naturelle de Genève (Suisse), livrent un essai fascinant et pédagogique sur la « désextinction » des espèces, un fantasme qui se précise dans les laboratoires, avec ses limites techniques, bien réelles, et ses questionnements éthiques.

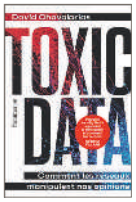
Des scientifiques modifient des bovins pour en faire des aurochs, d'autres tentent de recréer des espèces disparues en réveillant les gènes « éteints » d'animaux actuels : c'est le cas du « chickenosaurus », un poulet-dinosaure dont on essaie de faire repousser la queue et les dents. Certains travaillent à prélever de l'ADN d'animaux disparus — tigre de Tasmanie ou pigeon migrateur — pour les intégrer dans le futur embryon d'une espèce vivante proche, ou encore de modifier directement le génome de l'espèce en l'éditant par la méthode CRISPR-Cas9. Ces techniques sont déjà expérimentées pour le bouquetin des Pyrénées et même pour le mammouth !

Mais, alors que nous peinons déjà à protéger les espèces menacées, devrions-nous faire revenir les espèces disparues par notre faute ? Une Europe en partie réensauvagée devrait-elle accueillir ces mammouths recréés ou transformés à partir d'éléphants ? *« Ces animaux pourraient servir d'espèces parapluies, bénéficiant à tout leur écosystème »*, estiment les auteurs, qui invitent à réfléchir à la relation que nous entretiendrons avec le monde sauvage dans les siècles à venir. ■

Rachel Mulot

Faire revivre des espèces disparues ?
Lionel Calvin et Nadir Alvarez, Favre, 198 p., 22 €

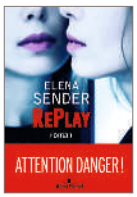
Vie politique, poison numérique



RÉSEAUX Une machine infernale. C'est l'impression qui ressort de cet essai d'un chercheur du CNRS, directeur scientifique du Politoscope, outil de suivi de tweets politiques. Il décrit comment une mécanique correspondant au *business model* des plateformes, celle de la personnalisation des contenus et de l'incitation des internautes à réagir, a pour effet polarisation, prime aux postures extrêmes, manipulations. Le livre détaille les notions de bulle de filtre, de biais de négativité ou de confirmation, de *rabbit hole*, tous participant à vicier la vie démocratique… ■ **A. D.**

Toxic Data, David Chavalarias, Flammarion, 300 p., 19 €

Plongée dans les métavers

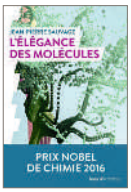


FRISSONS Imaginez un jeu high-tech permettant de revivre virtuellement nos souvenirs et d'en modifier le cours… De quoi s'amuser mais aussi atténuer un ancien traumatisme, régler ses comptes ou se réconcilier avec soi-même. Ce thriller haletant, nourri des dernières avancées de l'intelligence artificielle, nous plonge dans les promesses des métavers et en entrouvre les abîmes. Chair de poule garantie ! À la fin, une question : résisteriez-vous à l'envie d'enfiler casques et combinaison et de tester RePlay si l'occasion se présentait ? ■ **R. M.**

RePlay, Elena Sender, Albin Michel, 456 p., 20,90 €

Molécules animées

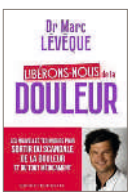
PLAIDOYER *« Le mouvement est un des fils rouges de ma carrière. »* Le chimiste strasbourgeois Jean-Pierre Sauvage a justement été récompensé en 2016 par l'Académie des Nobel pour avoir réussi à donner du mouvement à des molécules créées en laboratoire. Il a ouvert la voie à la création d'incroyables machines nanométriques. Dans cette autobiographie, il revient sur son parcours, guidé par la curiosité et l'amitié, inspiré par l'art et les mathématiques. Il en profite pour rappeler quelques fondamentaux : nos vies reposent sur la chimie ! Un vibrant plaidoyer pour la recherche et la beauté des molécules. ■ **M. G.**



L'Élégance des molécules, Jean-Pierre Sauvage, HumenSciences, 180 p., 18,90 €

Soigner la douleur

PRISE EN CHARGE Première cause de consultation chez le médecin, la douleur concerne, dans sa forme chronique, 14 millions de personnes en France. Or, seule une infime minorité, 3 %, bénéficie d'une prise en charge adaptée. L'auteur, neurochirurgien à Marseille, dresse le bilan de ces insuffisances et réussit le pari d'être à la fois clair et très documenté, entre références littéraires et historiques. À lire pour comprendre que la douleur n'est plus une fatalité *(lire aussi p. 66)*. ■ **S. R.-M.**



Libérons-nous de la douleur, Marc Levêque, Buchet Chastel, 240 p., 18,50 €

La physique et la biologie en images

PÉDAGOGIQUE Dans ces ouvrages denses mais digestes, l'astrophysicien Kurt Baker et la biologiste Helen Pilcher sont parvenus à expliquer toute la physique pour l'un, et toute la biologie pour l'autre. Particules élémentaires, trous noirs, lois de Newton, d'un côté. Virus, théorie de l'évolution, écologie, de l'autre, les auteurs n'hésitent pas à aborder des concepts touffus mais remarquablement soutenus par des illustrations didactiques, simples (mais pas simplistes) et colorées. Le résultat ? Vous ouvrez les livres pour vérifier une notion, et une heure plus tard vous êtes toujours plongés dedans car les thèmes s'enchaînent, et c'est finalement une passionnante histoire de la physique ou de la biologie qui s'offre à vous. Que vous soyez expert ou néophyte sur les sujets abordés, ces ouvrages parviennent à remarquablement bien tirer leur épingle du jeu de la vulgarisation scientifique. ■ **Fabrice Nicot et Hervé Ratel**

Les Bases de la physique en 60 notions illustrées, Kurt Baker, 192 p., 19,90 €. **Les Bases de la biologie en 70 notions illustrées,** Helen Pilcher. Delachaux et Niestlé, 192 p., 19,90 €

L'envers du numérique

ÉTHIQUE *« Là où l'existentialisme de Jean-Paul Sartre se résumait à la célèbre formule "L'existence précède l'essence", nous pouvons résumer aujourd'hui la condition humaine de nos congénères comme suit : "La présence en ligne précède et conditionne l'existence sociale". »* Cette proposition de Jean-Gabriel Ganascia, spécialiste d'éthique et d'intelligence artificielle, et chroniqueur régulier pour *Sciences et Avenir – La Recherche (lire p. 95)*, justifie le caractère impérieux de se livrer à une *« réflexion sur le fondement des normes morales et politiques de l'univers numérique »*. Le projet est ambitieux, mais l'auteur se pose en véritable guide du cyberespace. À l'aide d'une *« rose des vents numérique »*, il l'explore de façon méthodique et précise, puis porte des *« coups de marteau »* dans les grands principes éthiques jusqu'à dégager les préceptes pour ne plus être soumis aux servitudes virtuelles. Un essai libérateur. ■ **Mathieu Nowak**

Servitudes virtuelles, Jean-Gabriel Ganascia, Seuil, 320 p., 21 €

Scénarios des guerres à venir

ANTICIPATION En 2019, l'armée française s'est dotée d'une cellule de réflexion sur les guerres du futur, baptisée Red Team. Composée d'analystes, de chercheurs et d'auteurs de romans noirs et de science-fiction, elle a conçu des scénarios de conflits possibles à l'horizon 2030-2060. Quatre d'entre eux ont été déclassifiés et publiés dans cet ouvrage, qui décrit comment nos sociétés sont susceptibles d'évoluer. Les crises environnementales en cours devraient ainsi entraîner des migrations incoercibles et une montée des nationalismes. Refoulées vers les mers, des populations migrantes pourraient assurer leur subsistance grâce à la piraterie globalisée. La multiplication de puces et d'implants neuronaux devrait par ailleurs amener des hackers à prendre le contrôle d'êtres humains. La société pourrait aussi se diviser en communautés numériques partageant leur propre réalité, etc. Un ouvrage très intéressant, mais dont l'écriture assez sèche rend parfois la lecture ardue. ■ **Sylvie Rouat**

Ces guerres qui nous attendent 2030-2060, Red Team, Équateurs-PSL Université Paris, 222 p., 18 €

À la redécouverte de Louis Pasteur

BIOGRAPHIE Le bicentenaire de la naissance de Louis Pasteur est l'occasion pour l'ancien conservateur du musée éponyme, Annick Perrot, et l'ancien directeur général de l'Institut Pasteur Maxime Schwartz de nous plonger dans la vie méconnue de l'un des plus grands savants français. Richement illustré, l'ouvrage regorge d'anecdotes personnelles et professionnelles qui font redécouvrir l'homme par-delà la figure tutélaire de la science moderne, de l'invention des vaccins à son rapport à la foi et la politique en passant par sa vie de famille. ■ **H. J.**

Pasteur, l'homme et le savant, Annick Perrot et Maxime Schwartz, Tallandier, 240 p., 20,90 €

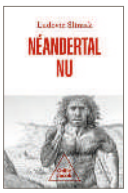
De la sortie d'Afrique au grand confinement

MIGRATIONS C'est à une histoire globale des migrations humaines depuis les premières sorties d'Afrique, que livre ici Jean-Paul Demoule. Des chasseurs-cueilleurs nomades aux populations sédentarisées ; de l'invention de l'écriture à Internet et le télétravail, ne nous trouvons-nous pas dans ces sociétés du futur « confinées » décrites par Isaac Asimov, où se déplacer ne serait plus nécessaire puisque tout vient à nous ? *« Nous assistons peut-être à la disparition prochaine des migrations humaines »*, estime l'auteur. ■ **B. A.**

Homo migrans, Jean-Paul Demoule, Payot, 430 p., 23 €

Sur les traces de Neandertal

ENQUÊTE Après trente ans passés *« à fouiller le sol des cavernes, à explorer les réserves des musées »*, Ludovic Slimak présente son regard *« de traqueur de néandertaliens »*. Avec le souhait de ne plus considérer notre défunt cousin comme un autre nous-même sur lequel auraient été portés nos projections et fantasmes. L'auteur parle plutôt d'une « créature » inattendue dont la nature pourrait bien nous avoir totalement échappé jusque-là. *Néandertal nu* où l'image revisitée de *« celui que l'on a limité à nous »*, alors qu'il est tout autre. ■ **B. A.**



Néandertal nu, Ludovic Slimak, Odile Jacob, 235 p., 22,90 €

Rester jeune... même vieux

CHEMINEMENT Vieillir est-il en soi une maladie ? Sans aucun doute pour cet éminent professeur de génétique à la Harvard Medical School (États-Unis) dont le best-seller vient d'être traduit en français. David A. Sinclair y retrace le cheminement qui l'a conduit à considérer le vieillissement non comme un processus inéluctable mais comme la mère de toutes les maladies. Surtout, il explore avec brio les efforts de la science pour traiter le temps qui marque les organismes, et donne les grandes lignes à suivre pour accroître l'espérance de vie tout en restant en bonne santé. ■ **H. J.**

Pourquoi nous vieillissons, Dr David A. Sinclair, Quanto, 432 p., 22 €

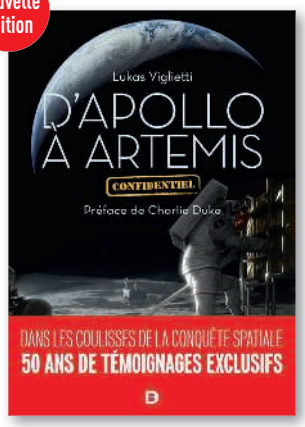
Aiguiser son sens critique

ÉCLAIRAGE Je pense, je choisis, je décide : mais comment ? La philosophe Joëlle Proust éclaire, dans cet ouvrage nourri par les neurosciences, les mécanismes qui sous-tendent nos prises de décision. Notre cerveau a tendance à trancher en fonction de différents sentiments et émotions, de biais métacognitifs tels le plaisir ou la facilité, ou sociocognitifs comme le genre ou l'appartenance à une classe sociale. Auquel cas, le chemin qui mène à l'action est tout dessiné. On pense et on décide par habitude cognitive ou par contrainte sociétale lorsqu'on lit toujours le même journal, on *like* un message ou on émet des jugements à l'emporte-pièce sur les réseaux sociaux, on exclut d'étudier les maths car on est une fille et que l'on réussira moins bien… L'auteur argumente alors en faveur de la créativité, d'un compromis entre l'impulsivité et la mise en place d'actions cognitives stratégiques, et plaide pour l'apprentissage scolaire de l'exercice du sens critique. Car penser bien, c'est aussi et surtout éviter de se laisser manipuler. ■ **Andreina De Bei**

Penser vite ou penser bien ? Joëlle Proust, Odile Jacob, 318 p., 24,90 €

Partez à la découverte de l'espace

Nouvelle Édition



D'Apollo à Artemis

9782807**339873** | **22,90 €**

Cinquante ans de conquête spatiale depuis le lancement du programme Apollo jusqu'à Artemis, le nouveau programme lunaire habité.

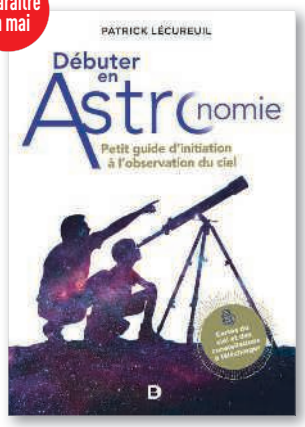
À paraître en avril

Astronomie en pratique

9782807**337022** | **29,90 €**

Ce livre permet de bien maitriser un instrument astronomique performant pour observer, photographier et comprendre le système solaire et le ciel.

À paraître en mai



Débuter en astronomie

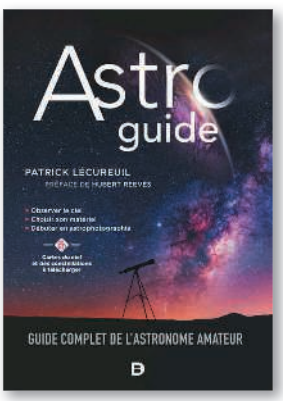
9782807**337183** | **12,90 €**

Un guide d'initiation pour observer le ciel à l'œil nu, se choisir un instrument d'observation adapté et s'initier à l'astrophotographie à l'aide d'un smartphone ou de tout autre appareil numérique.

À découvrir également

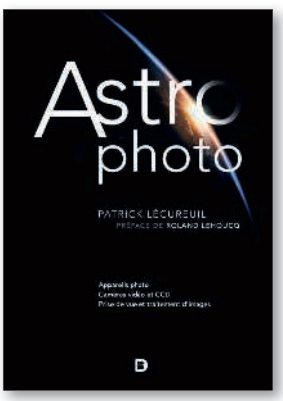
Histoire de la conquête spatiale

9782807**320758** | **25 €**



Astro guide

9782807**333079** | **26,90 €**



Astro photo

9782807**323643** | **30,50 €**

EXPOSITIONS

Auxerre (89)

Des animaux dans le ciel
Il y en a des choses dans le ciel : poissons, toucan, caméléon, grue, lièvre, chien, mais aussi chariot, louche, ou encore les Pléiades de la mythologie grecque… C'est l'objet de cette exposition : raconter comment les humains ont rendu familières les constellations du ciel nocturne et comment les étoiles ont été utilisées pour se repérer.
Muséum, 5, boulevard Vauban, jusqu'au 28 août. Rens. : 03.86.72.96.40.

Lens (62)

Rome, la cité et l'empire
C'est une petite ville du Latium, dans l'actuelle Italie, qui a donné son nom à un empire. Pour raconter ce destin, les collections romaines du Louvre parisien sont transférées à Lens dans le cadre d'une rétrospective en 400 œuvres.
Louvre-Lens, 99, rue Paul-Bert, du 6 avril au 25 juillet. Rens. : 03.21.18.62.62.

Meaux (77)

Tranchées
En 300 objets, œuvres et autres archives, le musée de la Grande Guerre consacre une exposition à l'ouvrage défensif que constitue la tranchée. Dans ce système complexe, tout en connexions et ramifications, il est question de combat et de vie quotidienne que le parcours fait revivre.
Rue Lazare-Ponticelli, jusqu'au 15 août. Rens. : 01.60.32.14.18.

Montbéliard (25)

En avant… Mars !
Accessible dès 8 ans, cette exposition retrace l'histoire des observations de la planète Rouge, effectuées depuis la Terre ou l'espace. Et, bien sûr, depuis Mars elle-même avec les rovers qui s'y sont succédé. Elle permet d'admirer des vues de ses paysages accidentés, sculptés par le volcanisme et l'eau.
Pavillon des Sciences, 5, impasse de la Presqu'île, du 4 avril jusqu'en mars 2023. Rens. : 03.81.91.46.83.

MEG-J.WATTS

Masque articulé de la métamorphose du saumon — refermé, il représente le poisson (Alaska).

Genève (Suisse) / Exposition

Injustice environnementale, alternatives autochtones

Le musée d'Ethnographie de Genève (MEG) met brillamment en scène des créations contemporaines et anciennes des peuples autochtones, en lien avec la crise climatique. Dès l'entrée de l'exposition, un planisphère éclairant : 500 millions d'individus éparpillés sur Terre, principales victimes d'injustice environnementale, prennent soin de 80 % de la biodiversité de la planète. Et alertent sur leurs droits. Le parcours de visite, fourni en témoignages écrits et sonores, dévoile peintures aborigènes, vanneries et poteries de Guyane, installations sami de Norvège, poèmes et masques d'Alaska. Telle « la métamorphose du saumon » (de David Robert Boxley), témoignage magnifique des liens entre humains et non-humains. Tous évoquent les précieuses relations de réciprocité avec le vivant, et des menaces bien réelles. La vidéo « Debout, toi l'insulaire », des poétesses Kathy Jetn il-Kijiner (îles Marshall) et Aka Niviâna (Groenland), évoquant la montée des eaux dans ces régions, en est un exemple saisissant. ■

Andreina De Bei

Musée d'Ethnographie de Genève, boulevard Carl-Vogt 65, jusqu'au 21 août. Rens. : +41 (0) 22 418 45 50

Paris

Cartes postales interstellaires
La dernière production du planétarium de la Cité des sciences est un voyage de 30 minutes autour du concept de vie extraterrestre. L'idée d'une pluralité des mondes remonte à l'Antiquité, mais les tentatives pour établir un contact datent du XIXe siècle. Cette aventure culmine avec le survol d'une exoplanète en vue d'artiste. (Lire notre article : sciav.fr/902planet)

30, avenue Corentin-Cariou, jusqu'au 8 mai. Rens. : 01.85.53.99.74.

La part de l'ombre, sculptures du sud-ouest du Congo
Derniers jours pour voir 160 œuvres de bois, statues, masques, outils datés de 1875 à 1950, d'une riche diversité plastique. L'occasion aussi d'en apprendre plus sur les échanges entre groupes sociaux, leurs rites, leur histoire (comme la révolte des Pende de 1931).
Musée du Quai-Branly-Jacques-Chirac, 37, quai Branly, jusqu'au 10 avril. Rens. : 01.56.61.70.00.

Puteaux (92)

Éternelle Notre-Dame
Sous la Grande Arche de la Défense, une expérience de réalité virtuelle plonge le visiteur pour des siècles d'histoire, du XIIIe siècle à nos jours. La visite donne un aperçu du quartier au Moyen-Âge et de la cathédrale, en chantier à l'époque, avant de se hisser sous les voûtes, dans la charpente et sur les toits.
1, parvis de la Défense. Rens. : 01.47.57.57.27.

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

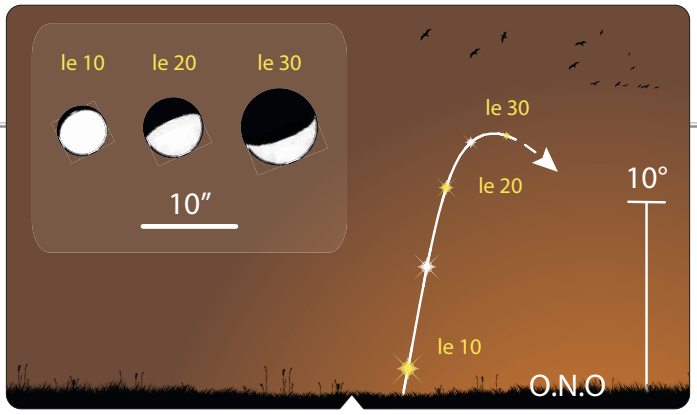
PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

MERCURE La petite planète passe en conjonction supérieure le 3 puis se dégage de la direction du Soleil pour atteindre sa plus grande distance angulaire (près de 21°) à l'est de celui-ci le 29.

VÉNUS L'étoile du Berger est observable en fin de nuit et au petit matin vers l'est sous la forme d'un point brillant. La faible ouverture de l'écliptique en cette saison lui impose toutefois une hauteur assez faible sur l'horizon. En milieu de mois, elle se lève environ 1 h 30 avant notre étoile.

MARS Comme le mois dernier, la planète Rouge est visible en fin de nuit, non loin de Vénus. Encore peu brillante, elle quitte la constellation du Capricorne pour celle du Verseau le 11.

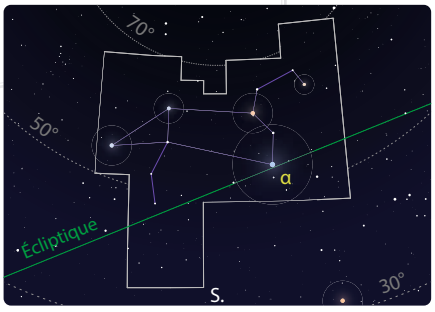


Nous sommes 30 minutes après le coucher du Soleil. La position de Mercure est donnée tous les 5 jours. L'encart présente le disque de la planète, très fortement grossi, les 10, 20 et 30.

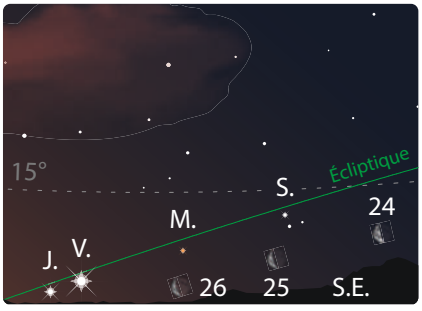
Mercure au meilleur de sa forme

TOUJOURS PROCHE EN DIRECTION DU SOLEIL, Mercure se trouve, ce mois, dans ses meilleures conditions d'observation de l'année en soirée. Elle est bien visible en seconde quinzaine vers le couchant. Bien que la planète se rapproche de nous, son éclat diminue régulièrement car elle nous présente de plus en plus son côté plongé dans l'ombre, phénomène que l'augmentation de son diamètre apparent ne peut compenser.

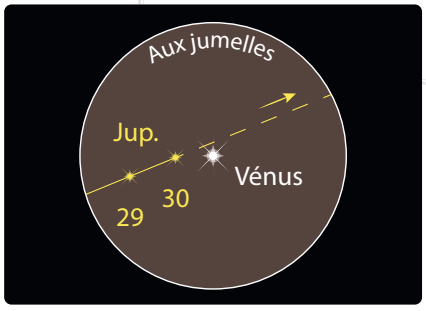
Notre conseil Il vous sera impératif de trouver un horizon ouest bien dégagé car la hauteur de Mercure demeure faible sous nos latitudes.



LE LION EST UNE BELLE CONSTELLATION DU ZODIAQUE dont l'étoile la plus lumineuse, Régulus (α), est multiple. Ses deux composantes principales sont séparables aux jumelles.



DU 24 AU 26, 1 H AVANT LE LEVER DU SOLEIL, la Lune en dernier croissant croise successivement la route des planètes Saturne (S), Mars (M), Vénus (V) et Jupiter (J).



LE MATIN DU 30, JUPITER NE SERA QU'À DEUX TIERS DE DEGRÉ DE VÉNUS, soit un peu plus que le diamètre apparent de la pleine lune. Un joli rapprochement à ne pas manquer !

JUPITER La plus grosse des planètes est passée en conjonction avec le Soleil le 5 mars. Elle émerge timidement des lueurs de l'aube et, au fil des jours, voit Vénus fondre sur elle. Un très beau rapprochement entre les deux planètes prendra place entre fin avril et début mai.

SATURNE La planète est un point peu brillant observable en fin de nuit, assez bas vers le sud-est. Elle passe le mois à 2° de Deneb Algedi, l'étoile principale de la constellation du Capricorne.

L'appli du mois

PLANET SATURN PARALLAX 3D LIVE WALLPAPER est une application gratuite sous Android. Elle vous permet d'installer un superbe fond d'écran animé qui représente Saturne en 3D naviguant devant la Voie lactée, au cœur de champs constellés d'étoiles.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel d'avril

Christophe Cassou Directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 1.

Céline Guivarch Directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec, groupe 3.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CHRISTOPHE CASSOU ET CÉLINE GUIVARCH

Il ne faut pas atteindre les limites dures de l'adaptation

Le constat scientifique est sans équivoque : le changement climatique est une menace pour le bien-être humain et la santé planétaire. Tout retard supplémentaire d'une action mondiale, concertée et solidaire, nous fera manquer la brève fenêtre d'opportunité que nous avons encore pour assurer un avenir viable. Ces mots tirés du deuxième volet du 6e rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), publié fin février, sont une alarme, une énième certes, mais la plus forte. 3,3 à 3,6 milliards d'habitants vivent aujourd'hui dans des environnements qui les rendent déjà très vulnérables aux changements climatiques. Cette vulnérabilité des populations, interdépendante de celle des écosystèmes terrestres et marins, varie considérablement d'une région à l'autre mais aussi à l'intérieur même d'une région, en raison de schémas différents de développement socio-économique et de gouvernance, de présence d'inégalités, etc. Des solutions d'adaptation existent. Celles intégrées et multisectorielles, qui s'attaquent aux inégalités sociales, et celles fondées sur la nature et la protection de la biodiversité, augmentent la faisabilité et l'efficacité de l'adaptation. Mais chaque fraction de réchauffement climatique supplémentaire accroît les effets négatifs prévus et les risques d'atteindre les limites de l'adaptation. Pour éviter des pertes et dommages croissants, il est urgent d'agir afin de concilier adaptation au changement climatique et réduction rapide et profonde des émissions de gaz à effet de serre. ■

Directrice de recherche au CNRS, Institut de recherche en informatique fondamentale (CNRS/université Paris Cité).

CLAIRE MATHIEU

MATHÉMATIQUES PAR CLAIRE MATHIEU

Des différentes manières de voter « utile »

L'élection présidentielle en France se fait par un scrutin uninominal majoritaire à deux tours, et seuls les deux candidats arrivant en tête du premier tour se maintiennent au second. Mais plutôt que de voter naïvement pour son candidat préféré au premier tour, il peut être préférable de voter « utile ». Par exemple, il peut être utile de reporter dès le premier tour son vote sur un candidat susceptible de l'emporter au second tour. Mais il existe un cas plus pervers. Étant donné un candidat A (droite) rassemblant 26 % des votants, B (centre-droit) 30 % et C (gauche) 44 % : si, au premier tour, les électeurs votent selon leurs préférences, cela conduirait à l'élimination de A puis à la victoire de B ; alors que, s'il y a assez de votants de gauche stratégiques qui votent pour A au lieu de C, cela pourrait conduire à l'élimination de B au lieu de celle de A, et donc à la victoire de C au second tour, conformément à leur préférence ! L'idée est de pousser un candidat qui sera inoffensif au second tour…
Cependant, il y a d'autres objectifs que celui d'orienter le résultat final. Par exemple, aider un candidat à avoir 5 % des voix (pour le remboursement de ses frais de campagne), ou exprimer ses idées. Des contre-stratégies existent, mais toutes ces manipulations induisent beaucoup d'incertitude, et c'est pourquoi le jugement majoritaire (utilisé lors de la primaire populaire) a été proposé comme mode de scrutin alternatif plus satisfaisant. ■

ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Est-il moral de parler d'argent à table, ou ailleurs ?

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Servitudes virtuelles*, Seuil, 2022 *(lire aussi p. 89)*.

BRUNO LÉVY

Les traités de savoir-vivre en conviennent : lors d'un déjeuner, on évitera les sujets qui fâchent, en particulier la religion, la politique et l'argent. Ce tabou s'impose surtout en France, vieux pays catholique et aristocratique, où l'on méprise la fatuité de celui qui se vante de ses possessions. Quant à cet autre qui se lamente de la dureté des temps et de ce dont il manque, il indispose. La politesse voudrait donc qu'on réserve les propos d'argent au cercle des intimes, et encore. Avec la généralisation de la gratuité, nous accédons tous aux mêmes services et sommes amis à peu de frais ; l'argent paraît donc moins discriminant. Comment ne pas s'en réjouir ! Pourtant, derrière cet effacement apparent, se cachent de féroces réalités. Un technologue américain, Jaron Lanier, évoque la légende des sirènes, ces êtres mythologiques, mi-femmes, mi-poissons, qui attiraient par leur chant les marins sur les rochers, où ils fracassaient leur navire, pour les croquer. Avec le gratuit, il en va de même : comment résister à l'attrait d'un clic pour lequel on ne débourse rien ? Ce faisant, on oublie que notre regard devient alors l'otage de ceux qui nous ont séduits. Au-delà, l'argent ne se réduit pas à la seule rétribution, ou à son absence : la monnaie y joue un rôle central. La confiance collective dans l'édifice social en dépend. Gagée d'abord sur l'autorité d'un prince, puis sur celle d'un État, ou parfois d'une entité supranationale comme l'Union européenne, elle était l'instrument d'une politique économique. Or, aujourd'hui, avec les cryptomonnaies, tout change : sa valeur repose sur un équilibre fragile entre offre et demande. Quelques bruits non fondés, des mouvements d'opinion qui s'emballent, et voici qu'un pan entier de l'économie mondiale bascule, sans que personne n'y puisse rien. Songeons que la masse monétaire du bitcoin correspond déjà à celle du franc suisse ! Bref, de l'argent, il convient aujourd'hui de parler, plus que jamais, et ce de toute urgence ! C'est une question d'éthique. ■

L'ŒIL DE LASCAR

Sidération. Après deux ans sous le joug du Covid-19, le monde est sous le coup de la guerre en Ukraine, déclenchée le 24 février par Vladimir Poutine. Côté épidémie, la France paraît pouvoir souffler un peu, depuis la fin du passe vaccinal et du port du masque dans de nombreux lieux, effective depuis le 14 mars. Mais l'angoisse d'un affrontement nucléaire brandi par le dirigeant russe n'est pas de nature à soulager notre « charge mentale » collective. **O. L.**

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

ZOOLOGIE

L'effet placebo est-il présent chez tous les animaux ?

Léa B.

Chez les humains, l'effet placebo n'est plus à démontrer : un tiers des sujets (en moyenne selon les études) ressentent l'effet bénéfique d'un traitement, indépendamment de son efficacité réelle. Mais il existe aussi chez les autres animaux ! La première preuve a été apportée en 2012 chez des rats (30 à 40 % ont été apaisés après une injection de solution saline inactive pour calmer une douleur induite par les chercheurs). Confirmation en 2017, avec une méta-analyse sur des chats atteints d'une maladie articulaire dégénérative, soulagés par l'attitude optimiste de leur maître. ■

Lise Loumé @Lise_Loume

ÉCOLOGIE

Quel impact le déclin des abeilles aurait sur l'humanité ?

Vinh H. L.

Le déclin global des pollinisateurs, essentiellement des abeilles, pourrait avoir des conséquences majeures. Selon une étude de 2015, il réduirait de 22,9 % les approvisionnements mondiaux en fruits, noix et graines et de 16,3 % en légumes. Ces changements alimentaires entraîneraient des carences en vitamines A et B9, vitales pour les femmes enceintes et les enfants, et augmenteraient l'incidence de maladies (cécité, maladies cardiaques, AVC et cancers). Le déclin des pollinisateurs pourrait provoquer jusqu'à 1,4 million de morts supplémentaires par an dans le monde ■ **L. L.**

JOHN MOORE/ AP/SIPA

Ces figures géantes dessinées sur le sol au Pérou ne sont visibles que du ciel.

ARCHÉOLOGIE

Comment les géoglyphes de Nazca ont-ils été tracés ?

Louis M.

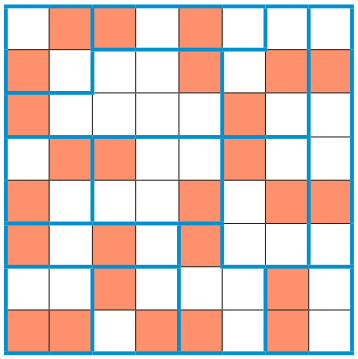
Les géoglyphes de Nazca (aussi nommées « lignes » de Nazca) sont des arabesques grandioses tracées par la civilisation nazca qui a fleuri au pied de la cordillère des Andes entre le IIIe siècle avant J.-C. et le VIIe siècle après J.-C. Mais aussi dans certains cas, par leurs prédécesseurs, les Paracas, des agriculteurs ayant vécu dans cette même région entre 800 avant J.-C. et 200 après J.-C. L'originalité de ces populations est d'avoir tracé sur le sol du désert ces assemblages étranges — des représentations d'êtres humains, de plantes ou encore d'animaux. Exécutées sur des terrains que l'oxyde de fer a colorés en gris, elles ont été pratiquées en grattant les couches superficielles du sol caillouteux, pour faire ressortir les niveaux gypseux plus clairs situés en dessous. Comment les Nazcas s'y sont-ils pris ? Au cours des fouilles menées ces dernières années, le mystère s'est éclairci peu à peu. Habiles tisserands habitués à manier de longs fils, les Nazcas s'aidaient de cordages, manipulés à partir de points fixes, pour tracer leurs figures. Ils s'inspiraient des mêmes motifs que ceux qui ornaient leurs poteries ou les précieux textiles qui firent leur notoriété. Les géoglyphes seraient liés à des calendriers agricoles, à un système d'irrigation complexe et à des lieux de cultes rituels dédiés à différentes divinités. Il s'agit peut-être aussi de marqueurs de territoire. Classés sur la liste du patrimoine mondial de l'Unesco depuis 1994, ils restent très fragiles en raison de la menace que fait peser sur elles la proximité de certaines zones urbaines. ■ **Bernadette Arnaud**

@NarudaaArnaud

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 901, mars 2022

Norinori

Deux cases colorées par zone



Constellations

Canis minor et Petit Chien d'une part, Camelopardalis et Girafe de l'autre, dans :

GEMINI
URSA MAJOR
SERPENS
URSA MINOR
CANIS MINOR
CAMELOPARDALIS
DRACO
SCORPIUS
HERCULES
MONOCEROS
ERIDANUS
POUPE
TAUREAU
GIRAFE
LIEVRE
BALANCE
CYGNE
HYDRE
COLOMBE
VIERGE
PETIT CHIEN
BOUCLIER
CASSIOPEE
LION
PAON

Drapeaux

On peut constituer 20 drapeaux dont les extrémités sont de même couleur : 5 choix pour le centre, 4 choix pour les extrémités.
Ensuite, il y a 5 x 4 x 3 = 60 choix de 3 couleurs, donc au total 20 + 60 = 80 drapeaux. Si l'on s'interdit d'inverser les drapeaux de 3 couleurs, ils ne sont que 30 et le total est 20 + 30 = 50.

Jules, Grégoire et Philippe

Si les lettres sont les initiales des mois du calendrier de Fabre d'Églantine (dont le premier prénom était Philippe et son rôle dans les dates moins fondamental), la suite complète de vendémiaire à fructidor est : V B F N P V G F P M T F

Repas de famille

Au minimum cet ensemble de six personnes répond à la description :
- un adolescent et une adolescente
- leur père et leur mère
- le père et la mère de la mère

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 893/894
100 trésors scientifiques

N° 895
Explorer l'espace

N° 896
Les super pouvoirs du cerveau

N° 897
Tempêtes, chaleur extrême, inondations

N° 898
Découverte d'un continent englouti

N° 899
Les 10 découvertes de l'année 2021

N° 900
Gravitation : la théorie qui dépasse Einstein

N° 901
Le nucléaire peut-il être propre ?

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France). Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45 av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

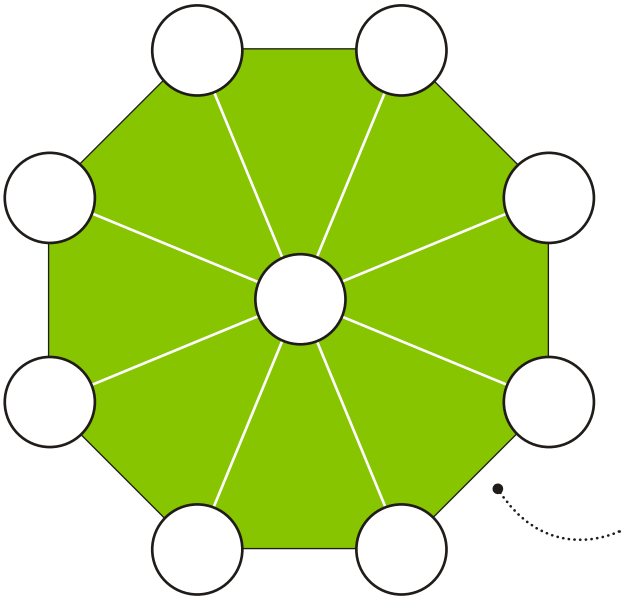
❑ N° 893/894 ❑ N° 895 ❑ N° 896 ❑ N° 897
❑ N° 898 ❑ N° 899 ❑ N° 900 ❑ N° 901

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

PAR PIERRE BERLOQUIN

Énigmes, logique et mathématiques

Retrouvez chaque mois des problèmes ludiques pour solliciter votre curiosité. Solutions dans le prochain numéro.



Deux hommes et un cheval

Deux hommes font un parcours avec un seul cheval. Chacun son tour, l'un monte le cheval pendant que l'autre marche, puis descend, attache le cheval qui attend pendant qu'il continue et que l'autre arrive pour prendre le cheval à son tour. Le piéton fait 6 km/h à pied et le cheval 12 km/h.

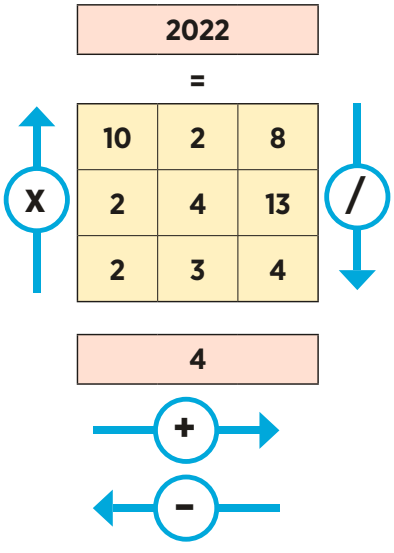
Comment peuvent-ils s'organiser et quelle part du temps le cheval est-il au repos ?

Magie dans l'octogone

Saurez-vous placer les nombres de 1 à 9 dans les cercles de telle sorte que la somme de chaque diamètre fasse 15 ?

Labyrinthmétique

Cheminez dans les cases jaunes pour aller de 4 à 2022. On multiplie en allant vers le haut, on divise en allant vers le bas, on additionne en allant vers la droite et on soustrait en allant vers la gauche. Il n'est pas obligatoire de passer par toutes les cases et ces dernières peuvent être utilisées plusieurs fois.



Un jour au Cambodge

Dans ce texte, certaines lettres sont rouges. Selon quelle règle ? Deux lettres supplémentaires devraient aussi être rouges. Lesquelles.

Un jour, au Cambodge, je circulais à bicyclette. Comme la température était élevée, j'étais en sandalettes et portais un short légèrement effiloché. J'avais pris un raccourci car j'avais un pneu dégonflé et en plus le sol était plutôt abrasif. Je dus mettre pied à terre.

Avril vingt-deux ?

Le but est de passer par anagrammes de AVRIL à VINGTDEUX. Chaque étape ajoute ou remplace une lettre, éventuellement en la changeant de place.

- A V R I L
- .....
- .....
- .....
- .....
- .....
- .....
- V I N G T D E U X

A vos côtés, pour votre santé !

Depuis 1992, nous vous offrons le meilleur des plantes, vitamines et minéraux, pour une santé chaque jour renforcée !

OFFRE DÉCOUVERTE dès **5€**

LABORATOIRES ILAPHARM

www.ilapharm.com

**Offre valable 1 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

Jambes légères
VIGNE ROUGE BIO

Active votre circulation sanguine pour des **jambes légères et confortables**.

5€ 45 gélules ~~11,20€~~

Mobilité articulaire
HARPAGOPHYTUM BIO

Conservez des **articulations souples, mobiles** et en bonne santé. *(3)*

5€ 45 gélules ~~11,40€~~

Brûle-graisse
GUARANA BIO

Boostez **l'élimination des graisses et la perte de poids**. *(1), (2), (5).*

6€ 45 gélules ~~12,10€~~

Libido
MACA BIO

Source d'énergie et aphrodisiaque, elle **stimule le désir sexuel**.

6€ 45 comprimés ~~13,10€~~

Os et articulations
SILICIUM ORGANIQUE et Vitamine C

Vitamine C (formation du collagène) et **Silicium** (constituant naturel) pour vos os et cartilages.

7€ 45 gélules ~~15,50€~~

Sommeil
PASSIFLORE BIO

Calmante et apaisante, elle procure **un sommeil de qualité**. Ni accoutumance, ni somnolence.

6€ 45 gélules ~~11,80€~~

Prostate
HUILE DE COURGE BIO

Aide au bon fonctionnement de la **prostate** et de la **vessie**. Pour un **bon confort urinaire**.

5€ 45 capsules ~~11,50€~~

Fatigue nerveuse
MAGNÉSIUM MARIN et B6

Il contribue au bon fonctionnement de votre **système nerveux**. *(6), (8).*
Allergène : ***poisson***.

6€ 45 gélules ~~11,40€~~

Cholestérol
AIL NOIR BIO

Il aide au maintien d'un **taux normal de cholestérol** et possède un **effet cardioprotecteur**. *(10).*

6€ 30 gélules ~~11,50€~~

Vigueur sexuelle
SAFRAN BIO

Le Safran Bio aide à **améliorer l'érection** et **stimule le désir sexuel**. *(2), (4).*

7€ 30 gélules ~~16,50€~~

Vitalité - Immunité
GINSENG SIBÉRIEN BIO

Stimulant et **énergisant**, il aide au bon fonctionnement du **système immunitaire**.

6€ 45 gélules ~~12,40€~~

Foie - Draineur
ARTICHAUT - RADIS NOIR BIO

L'artichaut favorise le **fonctionnement du foie et détoxifie**.

6€ 10 ampoules ~~14,30€~~ *(2), (9).*

Capacité sexuelle
TRIBULUS

Elle favorise le **désir**, la **capacité** et les **performances sexuelles** et participe à la bonne santé des organes reproducteurs.

7€ 60 gélules ~~16,50€~~

Un esprit vif
GINKGO BILOBA BIO

Arbre de jouvence, il favorise votre circulation cérébrale pour **un esprit vif et alerte**. *(2), (4), (7).*

6€ 45 gélules ~~11,70€~~

Articulations
FRÊNE BIO

Pour le bon fonctionnement des articulations. **Gardez le plaisir de bouger !**

5€ 45 gélules ~~11,30€~~

Défenses naturelles
ÉCHINACÉA BIO

Aide au bon fonctionnement du système de **défenses naturelles et respiratoire** (bouche et gorge).

6€ 45 gélules ~~11,70€~~

Vos 3 Cadeaux

LA LAMPE DYNAMO ÉCOLO

OFFERTE

SANS PILE *et* ***RESPECTUEUSE DE L'ENVIRONNEMENT***, *cette lampe dynamo écolo, vous fournira un éclairage constant, en toutes circonstances.*

+

Les Frais de Port
Dès 15€ d'achat
OFFERTS

0€

+

dès 5€ Tous vos produits
ÉCONOMISEZ PLUS DE 50%

Harpagophytum BIO	~~11,40~~	**5,00€**
Artichaut - Radis Noir BIO	~~14,30~~	**6,00€**
Vigne Rouge BIO	~~11,20~~	**5,00€**
Safran BIO	~~16,50~~	**7,00€**
Tribulus	~~16,50~~	**7,00€**
La Lampe Dynamo Écolo		**OFFERTE**
Frais de port	~~5,80~~	**OFFERTS**
TOTAL	~~75,70~~	**30,00€**

(1) Déconseillé aux enfants de moins de 12 ans. (2) Déconseillé aux femmes enceintes ou allaitantes. (3) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal et de calculs biliaires. (4) Ne pas associer avec des antidépresseurs. (5) Contient de la caféine (50 mg par jour). (6) Déconseillé aux insuffisants rénaux. (7) Ne pas associer avec des anticoagulants. (8) Possible effet laxatif. (9) Déconseillé en cas de troubles de la thyroïde. (10) Consultez votre médecin ou pharmacien en cas de prise simultanée d'anticoagulants. Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits.

OFFRE DÉCOUVERTE SANS ENGAGEMENT - BON DE COMMANDE

Vos coordonnées ☐ M^me ☐ M^r

Nom, Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....

Votre date d'anniversaire : |_|_|_|_|19|_|_|

E-mail* : .....

pour recevoir les **Newsletter ILAPHARM** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

et des **partenaires d'ILAPHARM** ☐ **OUI** ou ☐ **NON** **Recommandé pour la livraison.*

Choisissez votre mode de paiement

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**

N° |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Date d'expiration : |_|_|_|_|

Chiffres inscrits au dos de ma carte : |_|_|_|

Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :** ○ débit immédiat ○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

NOM DU PRODUIT	RÉF.	QTÉ	PRIX RÉDUIT	TOTAL
Vigne Rouge BIO	PVRB45		5€	
Harpagophytum BIO	PHAB45		5€	
Guarana BIO	PGUB45		6€	
Maca BIO	PMAB45		6€	
Silicium Organique et Vitamine C	PSV45		7€	
Passiflore BIO	PPAB45		6€	
Huile de Courge BIO	PPCB45		5€	
Magnésium Marin et B6	PMM45		6€	
Ail Noir BIO	PANB30		6€	
Safran BIO	PSFB		7€	
Ginseng Sibérien BIO	PGSB45		6€	
Artichaut - Radis Noir BIO	PXRAB		6€	
Tribulus	PTR		7€	
Ginkgo Biloba BIO	PGBB45		6€	
Frêne BIO	PFNB45		5€	
Echinacéa BIO	PECB45		6€	
☐ Je reçois **GRATUITEMENT** ma **LAMPE DYNAMO** et mon **CATALOGUE**				**OFFERTS**
☐ Ma commande atteint 15€, **j'économise 5,80€ sur les frais de port**				**OFFERTS**
☐ Ma commande est inférieure à 15€, **je rajoute 5,80€**				
CODE PRIVILÈGE : **CS430**			**TOTAL À RÉGLER**	..... €

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38 112€, RCS Nanterre B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Tél Sce client 01.49.09.11.11. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité de votre cadeau, nous pourrons le remplacer par un autre d'une valeur similaire. Pour recevoir votre cadeau sans commander, joignez un chèque de 5,80€ de frais, envoi sous 90 jours. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits que vous confère le Règlement européen sur la protection des données, veuillez nous écrire, téléphoner au 01.49.09.11.11 ou consulter nos conditions générales de vente sur notre site internet. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés dont la mise en œuvre et le contenu sont prévus aux articles L. 217-4 et suivants du Code de la consommation. Vous disposez d'un délai de rétractation de 30 jours après livraison de votre commande pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitée dans les 24h suivant sa réception, vous recevez votre commande après 72h d'acheminement environ. Les Laboratoires ILAPHARM adhèrent à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (60 rue de la Boétie - 75008 Paris-relationconso@fevad.com). Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, consultez www.manger-bouger.fr. Conditions générales de vente : www.ilapharm.com/conditions-generales-de-vente.html Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres des Laboratoires Ilapharm, cochez cette case ☐ ou écrivez-nous. Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres de nos partenaires (commerciaux ou organismes) : cochez cette case ☐ ou écrivez-nous.

NOS GARANTIES :

PAYEZ DANS 1 MOIS

Envoyez votre ***règlement par chèque, avec votre bon de commande****, il ne sera encaissé que dans 1 mois.*

Charte Qualité fevad · synadiet · Traitement Rapide 24h COLIECO

POUR COMMANDER :

@ ***Par internet :***

www.ilapharm.com

Par téléphone :

01 49 09 11 11

Du lundi au vendredi : 9h -13h et 14h -18h

Par courrier :

Laboratoires ILAPHARM
C/O BSL, BP 60475, 35171 BRUZ CEDEX

Les contenants en plastique (PE, PP, PEHD), verre, papier, carton, les couvercles des flacons plastiques ainsi que tous les documents papiers sont recyclables.

Bienvenue en première classe !

Découvrez Avast One Essentiel, la protection complète et GRATUITE pour 2022.

- Antivirus et Pare-feu avancé
- Protection virus et malwares
- Anti-ransomware
- VPN et masque d'adresse IP
- Anti-suivi sur Internet
- Surveillance des violations de données
- Accélérateur de PC

PLUS GRAND RÉSEAU
DE DÉTECTION DES MENACES

PLUS DE 400 MILLIONS
D'UTILISATEURS DANS LE MONDE

Téléchargez gratuitement sur avast.com/sciences

Avast One

© 2022 Copyright Avast Software